



Jens Grönniger

Ansprache der inneren Struktur von Asphalt und Einfluss auf ausgewählte Asphalteigenschaften

2018

Heft 34 • Braunschweig 2018 • ISBN 978-3-932164-34-7

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Eingereicht am
Disputation am

05. Mai 2017
31. Juli 2017

Berichterstatter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba
apl. Prof. (a. D.) Dr.-Ing. habil. Peter Renken

Danksagung

Zu allererst möchte ich Professor Michael P. Wistuba für sein Vertrauen und die unermüdliche Unterstützung bei meiner Arbeit am Institut danken. So war er für mich durch seinen fachlichen Rat und durch seine freundschaftliche und unkomplizierte Art ein Doktorvater wie man ihn sich wünscht. Nicht zuletzt hat er es mir durch den notwendigen Freiraum erst ermöglicht, die Arbeit zu vollenden.

Professor Peter Renken danke ich für seine Bereitschaft, als Zweitprüfer meine Arbeit unter die Lupe zu nehmen und durch seine Erfahrung wichtige Impulse zum Gelingen der Dissertation beizutragen. Für die Mitwirkung bei der Verteidigung meiner Arbeit möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Gerke als Prüfer, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Meon als Vorsitzenden der Prüfungskommission danken.

Ein herzliches Dankschön gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am ISBS. Durch ihren aufmunternden Zuspruch haben sie mir stets die notwendige Motivation und Ausdauer in der Bearbeitungsphase gegeben.

An dieser Stelle sei auch der Gerhard und Karin Matthäi Stiftung aufrichtig gedankt, die meine Promotion gefördert hat.

Zu guter Letzt bin ich meiner Familie für Ihre Geduld und das bedingungslose Vertrauen in mich überaus dankbar.

Vorwort des Herausgebers

Beim Einbau von Walzasphalt wird das Asphaltmischgut durch Walzen mittels Walzenzügen verdichtet. Das Walzen hat zum einen den Zweck, die Schichtdicke gleichmäßig auf ein Sollmaß einzustellen, und zum anderen spätere Verformungen vorwegzunehmen um eventuelle Schäden zu vermeiden. Denn es besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Verdichtungsleistung und der Lebensdauer der Asphaltstraße. Daher wird der Verdichtungsleistung beim Einbau eine hohe Bedeutung zugemessen, und Art, Gewicht und Anzahl der Walzen werden auf die Einbauleistung, die resultierende Schichtdicke, die Asphaltmischgutart mit oder ohne viskositätsverändernde oder sonstige Zusatzmittel sowie auf die Witterung abgestimmt. Im Anlieferungszustand ist das Asphaltmischgut noch heiß, bei einer Mischguttemperatur von mindestens 130 bis 195°C abhängig vom enthaltenen Bindemittel. Während Einbau und Walzvorgang kühlt das Mischgut aus und es ergibt sich in Abhängigkeit der Mischgutviskosität und der Witterung ein enges Zeitfenster für die Verdichtung. Die Überprüfung der Verdichtungsleistung erfolgt anhand von Bohrkernen aus der fertigen, ausgekühlten Asphaltschicht. Am Bohrkern werden der Hohlraumgehalt und der Verdichtungsgrad bestimmt. Beide Kenngrößen dürfen bei jeder aus der Verkehrsflächenbefestigung aus Asphalt zu entnehmenden Probe im Regelwerk definierte Grenzwerte nicht unterschreiten. Im Labor kann der Verdichtungs Vorgang durch die Walze mit einem Walz-Sektor-Verdichtungsgerät simuliert werden, wie es hier in Braunschweig vor Jahrzehnten entwickelt wurde und heute international weit verbreitet ist. Im Walz-Sektor-Verdichtungsgerät wird das Asphaltmischgut in einem Formkasten zu Platten verdichtet, indem ein der Walzenbandage nachempfundenes Stahlsegment auf dem Mischgut drückend und ausreichend lang hin und her bewegt wird. Während der Laborverdichtung kann die Verdichtungsleistung durch Messung von Kraft und Weg aufgezeichnet werden. So können im Labor aus einem Asphaltmischgut unter kontrollierten Verdichtungsbedingungen mehrere Platten mit gleichem Hohlraumgehalt und gleichem Verdichtungsgrad hergestellt und aus diesen Probekörper für weitere Prüfungen geschnitten bzw. gebohrt werden. In nachfolgenden Ermüdungs- und Verformungsprüfungen wurde allerdings festgestellt, dass hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad gleiche Probekörper nicht zwingend dasselbe Gebrauchsverhalten aufweisen müssen. Denn was durch die Kenngrößen Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad nicht beschrieben wird, ist die innere Struktur des Gesteinsskeletts, das sich für jedes Asphaltmischgut in Abhängigkeit von den Verdichtungsbedingungen individuell ausbildet. Asphalt, im Wesentlichen bestehend aus Gesteinskörnung und dem Bindemittel Bitumen, ist noch während der Verdichtung eine zähflüssige Masse, dessen Gesteinskörner sich unter dem Gewichtsdruck der Walze und gegebenenfalls durch eine vibratorische Erregung der Walzenbandage in einem Fließvorgang ungeordnet bewegen. Nach dem Auskühlen entsteht eine zufällige innere Struktur, deren Auswirkung auf das Gebrauchsverhalten bisher unzureichend untersucht wurde. Dabei liegt der Verdacht nahe, dass die innere Asphaltstruktur, also beispielsweise die Verteilung der Hohlräume, die Anzahl an Kontaktpunkten des Gesteinskörnungsgerüsts sowie die Orientierung der Einzelkörner, das Gebrauchsverhalten der Asphaltbefestigung unter Belastung beeinflusst. Und vermutlich reichen Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad nicht aus, um die Verdichtungsleistung ausreichend zu beschreiben.

Der Autor Dr.-Ing. Jens Grönniger, geb. 1980 in Mainz, ist seit 2007 als wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 2017 als Akademischer Rat und stellvertretender Prüfstellenleiter am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig tätig. Seine breite wissenschaftliche Publikationstätigkeit umfasste u. a. die Themen Haftverhalten zwischen Bitumen und Gestein, Einfluss der Asphaltmörtelphase auf die wesentlichen Asphalteigenschaften und Wiederverwendung von Ausbauasphalt. Mit der in diesem Heft publizierten Arbeit, die 2017 als Dissertation an der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der TU Braunschweig zur Promotion eingereicht und erfolgreich als Promotionsschrift angenommen wurde, stellt Jens Grönniger die Forschungsfrage: Beeinflusst die innere Asphaltstruktur das Gebrauchsverhalten, und anhand welcher einfach zu bestimmender Parameter kann die innere Asphaltstruktur beschrieben werden? Dazu untersuchte er im Labor insgesamt fast 30 verschiedene Asphaltgemische, unter Variation der Gesteinsart, der Asphaltgranulatzugabe, der Bindemittel und der Additivzugabe. An Probekörperquerschnitten wurden mittels Flachbettscanner Digitalbilder angefertigt und die Digitalbilder mittels digitaler Bildanalyse untersucht. Es wurden verschiedene Indizes zur Beschreibung der inneren Struktur ausgewertet. Dann wurde das Gebrauchsverhalten der Asphaltgemische geprüft anhand von Zug-Schwellversuchen zur Ansprache des Ermüdungswiderstandes und anhand von Triaxialprüfungen zur Ansprache des Verformungswiderstands. Die Prüfergebnisse wurden im Hinblick auf Zusammenhänge mit ausgewählten Strukturindizes untersucht. Als Ergebnis der Dissertation kann festgehalten werden, dass die zweidimensionale Bilderfassung und anschließende Bildanalyse erfolgreich zur Bestimmung von Parametern für die Charakterisierung der Asphaltstruktur eingesetzt wurden und die grundsätzliche Eignung der Bildanalyse zur Charakterisierung der Asphaltstruktur nachgewiesen ist. Es wurden ferner statistisch signifikante Zusammenhänge gefunden zwischen dem Gebrauchsverhalten von Asphalt und der inneren Struktur. Am deutlichsten zeigt sich dieser Zusammenhang zum Ermüdungswiderstand. Mit zunehmenden Kontaktlängen zwischen den Gesteinen werden höhere Bruchlastwechselzahlen erreicht und umso einheitlicher die Kontaktorientierung desto widerstandsfähiger ist die Asphaltstruktur gegenüber der Dauerbeanspruchung. Für die Praxis bedeuten die Ergebnisse der Dissertation, dass es aus materialtechnologischer Sicht einen Bedarf gibt, die Kontrolle der Verdichtungsleistung auf der Asphaltbaustelle zu verbessern, weil Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad keine ausreichenden Merkmale dafür sind. Im Hinblick auf die Prüfpraxis im Labor sind im Rahmen von zyklischen Laborprüfungen die Schwankungen in den Probekorpereigenschaften auf die Prüfergebnisse näher zu untersuchen und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Jens Grönniger hat mit dieser Dissertation erfolgreich wichtige Bausteine zur Weiterentwicklung von Methoden zur Beschreibung der Asphalteigenschaften geschaffen. In der Wissenschaft wie privat wünsche ich meinem lieben Kollegen weiterhin viel Freude und Erfolg,

Braunschweig, im Mai 2018

Michael P. Wistuba

Kurzfassung

Zu den grundlegenden Einflussfaktoren auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt zählt die Mischgutzusammensetzung, also die Wahl der Gesteinsart, einer Korngrößenverteilung und die Festlegung der Bindemittelart/-sorte und -menge. Nach der Verdichtung bildet sich eine innere Asphaltstruktur aus, die durch die konventionellen volumetrischen Kenngrößen Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad kaum abgebildet wird. Da gleiche Asphalte mit vergleichbarem Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad jedoch ein sehr unterschiedliches Gebrauchsverhalten aufweisen können, ergibt sich die Notwendigkeit, die innere Asphaltstruktur mittels geeigneter Strukturindizes zu beschreiben, um den Einfluss auf das Gebrauchsverhalten prognostizieren zu können.

Ziel der Arbeit war es, den Einfluss der inneren Asphaltstruktur und der Mörtelviskosität auf den Ermüdungs- und Verformungswiderstand zu untersuchen. Dazu wurden Asphalte unter Variation der Gesteinsart, der Asphaltgranulatzugabe und der Additivzugabe gemischt und Asphalt-Probekörper für Zug-Schwellversuche zur Ansprache des Ermüdungswiderstandes und für Triaxialprüfungen zur Ansprache des Verformungswiderstands hergestellt. An Probekörperquerschnitten wurden mittels Flachbettscanner Digitalbilder erfasst und daraus mittels digitaler Bildanalyse Strukturindizes gewonnen, die die innere Asphaltstruktur hinreichend genau abbilden. Dabei wurden kontaktbasierte (bspw. Anzahl Gesteinskontakte) sowie orientierungsbasierte Indizes (Kontaktorientierung) berücksichtigt. Die Strukturindizes wurden mit den Ergebnissen der unterschiedlichen Versagensmechanismen Ermüdung und Verformung auf Zusammenhänge untersucht. Zusätzlich wurde mittels dynamischem Scherrheometer die Asphaltmörtelviskosität bestimmt und deren Einfluss auf die resultierende innere Asphaltstruktur untersucht.

Auf Basis der Ergebnisse kann die aufgestellte These, dass das Gebrauchsverhalten von Asphalt durch die „innere Struktur“ maßgeblich mitbestimmt wird für den Ermüdungswiderstand und mit Einschränkungen für den Verformungswiderstand bestätigt werden. Dagegen konnte kein systematischer Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf die resultierende innere Asphaltstruktur identifiziert werden.

Abstract

Among the major influencing factors on the asphalt performance is the mix composition, i. e. the aggregate type, the gradation and the choice of the binder type and binder content. After compaction, an inner asphalt structure is formed which is not represented by the conventional volumetric parameters void content and degree of compaction. However, as similar asphalts with comparable void content and degree of compaction can show very different performance characteristics, there is a need to describe the inner asphalt structure by means of suitable structural indices in order to be able to predict the influence on the asphalt performance.

The aim of the study was to investigate the influence of the inner asphalt structure and the asphalt mortar viscosity on the fatigue and deformation resistance. For this purpose asphalt mixtures were produced under variation of the aggregate type, the addition of reclaimed asphalt and the addition of additives. Subsequently asphalt specimens for tensile swelling tests to address the fatigue resistance and for triaxial tests to address the deformation resistance were prepared. By means of a flat bed scanner, digital images of specimen cross-sections were acquired and, using digital image analysis, structural indices were obtained which represented the inner asphalt structure accurately and reliably. Contact-based structural indices (e.g. number of stone contacts) and orientation-based indices (contact orientation) were taken into account. The structural indices were compared to the results of the different failure mechanisms fatigue and deformation to identify potential correlations. In addition, the asphalt mortar viscosity was determined by means of dynamic shear rheometer and the influence on the resulting inner asphalt structure was investigated.

On the basis of the results, the proposed thesis that the performance characteristics of asphalt are significantly influenced by its "inner structure" can be confirmed for the fatigue resistance and with restrictions for the deformation resistance. On the other hand, no systematic influence of the asphalt mortar viscosity on the resulting inner asphalt structure could be identified.

Inhalt

Kurzfassung	V
Abstract	VI
Inhalt	VII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Problemstellung	1
1.2 Ziel.....	3
1.3 Untersuchungsmethodik	4
2 Grundlagen und Stand der Technik zur Strukturanalyse	6
2.1 Digitale Bildanalyse	6
2.1.1 Bildgewinnung	8
2.1.2 Bildverarbeitung.....	12
2.1.3 Bildanalyse und -auswertung	19
2.2 Anwendung auf Asphalt	24
2.2.1 Charakterisierung der Gesteinskörnung.....	25
2.2.2 Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur	28
2.3 Zusammenfassung der für die Auswahl eines Bildanalyseverfahrens notwendigen Erkenntnisse.....	37
3 Grundlagen zur Asphaltmörtelcharakterisierung	40
3.1 Definition Asphaltmörtel.....	40
3.2 Funktion des Asphaltmörtels	40
3.3 Einflussfaktoren auf die Asphaltmörtelviskosität und Auswirkung im Asphalt	41
3.4 Rheologische Charakterisierung.....	45
3.4.1 Grundlagen der Rheologie	45
3.4.2 Rheologie des Asphaltmörtels.....	49
4 Untersuchungsprogramm.....	51
4.1 Eingesetzte Baustoffe	52
4.1.1 Gesteine	52
4.1.2 Bitumen	52
4.1.3 Wachsadditive	52
4.1.4 Asphaltgranulate.....	54
4.1.5 Asphaltherstellung.....	54
4.2 Prüfungen der Baustoffe	59
4.2.1 Asphaltmörtelprüfungen.....	59
4.2.2 Asphaltprüfungen	62
4.3 Strukturindizes mittels Bilderfassung und -analyse	68
4.3.1 Bilderfassung.....	68
4.3.2 Bildanalyse	70
5 Untersuchungsergebnisse und Interpretation	77
5.1 Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und volumetrischen Kenngrößen	77

5.2	Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und Ermüdungswiderstand.....	80
5.2.1	Korrelationen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur	82
5.2.2	Korrelationen in Abhängigkeit von der Art der Wachsmodifikation.....	92
5.2.3	Korrelationen in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Asphaltgranulats...	94
5.3	Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und Verformungswiderstand....	96
5.3.1	Korrelationen in Abhängigkeit von der Art des Asphaltgranulats	97
5.3.2	Korrelationen in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Asphaltgranulats.	100
5.3.3	Korrelationen unbelastete innere Asphaltstruktur.....	102
5.4	Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf innere Asphaltstruktur.....	105
5.4.1	Korrelationen komplexer Schermodul und Phasenwinkel	105
5.4.2	Korrelationen Äqui-Schermodul-Temperatur und Phasenwinkel.....	111
5.5	Schlussfolgerungen.....	116
6	Zusammenfassung.....	119
6.1	Problemstellung	119
6.2	Vorgehen	120
6.3	Ergebnis und Ausblick.....	121
7	Literatur	123
8	Anhang	132

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Asphaltbefestigungen sollten so konzipiert sein, dass die Lasten aus der Verkehrsbeanspruchung abgetragen werden, und sie dauerhaft widerstandsfähig gegenüber Witterungseinflüssen sind. Die Identifizierung aller maßgebenden Beanspruchungen, die Analyse des resultierenden Gebrauchsverhaltens und eine darauf abgestimmte Asphaltkonzeption ist ein grundlegendes Ziel in der Asphaltforschung. Mit den richtigen Kenntnissen kann die Wahl adäquater Baustoffe, Bauverfahren sowie von Erhaltungsmaßnahmen zum richtigen Zeitpunkt einen möglichst wirtschaftlichen Einsatz der Mittel gewährleisten.

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der These, dass das Gebrauchsverhalten von Asphalt – insbesondere der innere Zusammenhalt des Asphalts – nicht durch die volumetrischen Asphalteeigenschaften allein, resultierend aus Mischgutzusammensetzung, Viskosität von Bitumen und Mörtel, Verdichtung etc. beeinflusst wird, sondern durch die „innere Struktur“ maßgeblich mitbestimmt wird. (Abbildung 1).

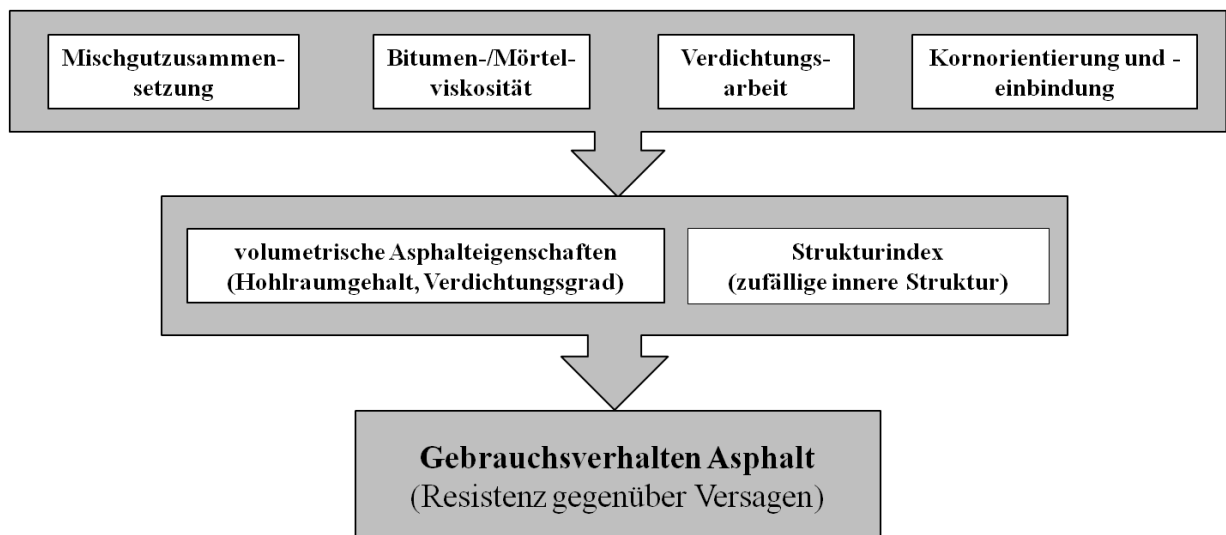


Abbildung 1. Grundlegende Einflussfaktoren auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt.

Zunächst übt die Mischgutzusammensetzung (Asphaltrezeptur) einen direkten Einfluss auf die resultierende innere Struktur aus. Die grundsätzliche Ausprägung der inneren Asphaltstruktur wird durch die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Asphaltrezepturen der unterschiedlichen Asphaltarten und -sorten unterscheiden sich primär durch die Korngrößenverteilung, was in den zugrundeliegenden Bauprinzipien deutlich wird. Für Asphalte gelten folgende idealisierte Bauprinzipien

- Mastix-Konzept / eingefrorene Flüssigkeit (z. B. Gussasphalt),
- Packungs-Konzept / Betonprinzip (z. B. Asphaltbeton),
- Stützgerüst-Konzept / Makadamprinzip (z. B. Splittmastixasphalt).

Das Mastix-Konzept für Gussasphalt beruht auf einer stetig verlaufenden Sieblinie im oberen Bereich. In Verbindung mit einem hohen Bindemittelgehalt bildet sich ein hohlraumfreier Asphaltmörtel, indem die groben Gesteinskörner "schwimmen". Die Lastabtragung erfolgt hauptsächlich über die Asphaltmörtelphase und nicht über die groben Gesteinskörnungen. Die innere Asphaltstruktur von Gussasphalt ist kein zusammenhängendes Korngerüst der groben Gesteinskörnungen und unterscheidet sich damit grundsätzlich von Strukturen von Asphalten mit anderen Tragkonzepten.

Asphalte, die nach dem Packungs-Konzept zusammengesetzt sind, weisen eine stetige Sieblinie im mittleren Bereich auf, wodurch die theoretisch dichteste Packungsdichte der Gesteinskörnungen erreicht wird. Die volumetrischen Eigenschaften solcher Asphalte sind charakterisiert durch einen sehr hohen Gesteinsanteil bei gleichzeitig minimalem Bindemittelgehalt. Der Lastabtrag erfolgt über das entstehende dichte Gesteinsgerüst und den Materialverbund.

Die Tragwirkung von Splittmastixasphalt und insbesondere offenporigem Asphalt beruht auf dem Stützgerüst-Konzept. Durch eine Korngrößenverteilung, die einen unstetigen Verlauf aufweist – üblicherweise ein flacher Verlauf im Bereich der feinen Gesteinskörnungen gefolgt von einem sprunghaften Anstieg im Bereich der groben Gesteinskörnungen – entsteht ein Korngerüst, bei dem die einwirkenden Kräfte primär über die mechanische Verzahnung und Verkantung der groben Gesteinskörnung abgetragen werden.

Neben der Korngrößenverteilung beeinflussen die Viskosität des Bitumens und des Asphaltmörtels die resultierenden Asphalteigenschaften. Die Bitumenviskosität lässt sich über die Wahl eines für den jeweiligen Asphalt geeigneten Bitumen steuern. So werden üblicherweise höher viskose, harte Bitumen (bspw. Straßenbaubitumen 30/45) für Gussasphalte bei besonders stark beanspruchten Verkehrsflächen eingesetzt. Auf weniger belasteten Verkehrsflächen, die beispielsweise als Asphaltbetondeckschicht für leichte Beanspruchungen (AC 8 D L) ausgeführt sind, finden niedriger viskose Bitumen (bspw. Straßenbaubitumen 70/100) Anwendung.

Bei der Asphaltherstellung entsteht durch die Vermischung des Bitumens mit den feinen Gesteinskörnungen der Asphaltmörtel. Eine maßgebende Asphaltmörtелеigenschaft im Hinblick auf dessen Funktion im Traggerüst (primäre Lastabtragung im Mastix-Konzept vs. das Korngerüst punktuell verklebende Funktion im Stützgerüst-Konzept) ist die Asphaltmörtelviskosität. Neben der Bitumenviskosität wird die Asphaltmörtelviskosität von den granulometrischen und mineralogischen Eigenschaften des Füllers mitbestimmt. Oftmals wurde der Einfluss des Füllers auf die Viskosität des Mörtels untersucht, wobei der Fokus der Veröffentlichungen auf der Ansprache und der Bewertung von Füllereigenschaften wie spezifische Oberfläche, Bindemittelbedarf und Lagerungsdichte lagen (Pöbel, 1929; Wichert, 1929; Gonell 1934a, 1934b; Schindler, 1939; Ruck, 1962; Holl, 1963, 1965; Ewers und Heukelom, 1964; Schuhbauer, 1966; Arand 1971; Suss, 1971; Wagner, 1974). Zur Funktion des Asphaltmörtels im Asphaltmischgut sind zwei Theorien allgemein anerkannt, wonach zum einem die feinen Gesteinskörnungen den Hohlraum zwischen den großen Gesteinskörnungen füllen, um dadurch ein dichteres und festeres Korngerüst zu erhalten (Theorie des Hohlraumminimums). Zum anderen wird der Asphaltmörtel als Gemisch aus feinen Gesteinskörnungen und Bitumen als

vorrangig verkittendes Element der Gesteinskörnungen gesehen (Mörteltheorie) In der Mörteltheorie wird daher dem Asphaltmörtel primär eine versteifende Wirkung zugeordnet. Ein Großteil der angegebenen Untersuchungen stützt sich auf diesen Ansatz.

Der Zusammenhang zwischen der Mischarbeit und Verarbeitbarkeit (Mischviskosität), also letztlich die eingebrachte Verdichtungsarbeit, wurde von Steinhoff (1977) untersucht. Ein klarer Zusammenhang zwischen Mischviskosität und Füller-/Sandart wurde nachgewiesen. Feix (1979) kommt zum selben Erkenntnis und stellt den signifikanten Einfluss der Füller- und Sandeigenschaften wie Gesteinsart, Oberflächenrauigkeit und Kornform auf die Verdichtungswilligkeit und die resultierenden Hohlraumgehalte fest.

In neueren Studien wurde ein maßgebender Einfluss des Asphaltmörtels auf ausgewählte Asphalteigenschaften festgestellt, konkret auf die Ermüdungs- und Verformungseigenschaften (Anderson, 1996; Kandal et al., 1998; Montepara et al., 2011), wie auch auf das Haftverhalten / Wasserempfindlichkeit (Kandal et al., 1998; Aljassar et al., 2004; Prowell et al., 2005; Airey et al., 2008). Erste Hinweise, dass sich die Viskosität des Asphaltmörtels systematisch auf die resultierende innere Asphaltstruktur auswirkt, liegen ebenfalls vor (Roohi, 2014).

Um den Zusammenhang zwischen der Tragstruktur und der Asphaltmörtelviskosität zu untersuchen, muss zum einen die Asphaltmörtelviskosität physikalisch einwandfrei ermittelt werden. Grundsätzlich erscheint hierfür die Bestimmung der Asphaltmörtelviskosität mittels DSR-Analytik (Anderson et al., 1992; Harris und Stuart, 1995; Guber et al., 1999, Liao et al., 2013) sinnvoll. Zum anderen ist die Tragstruktur durch geeignete Kennwerte so zu charakterisieren, dass das Potential der jeweiligen Tragstruktur bezüglich Zusammenhalt und Lastabtragung – und damit letztlich zur Prognose der Gebrauchseigenschaften – quantifiziert werden kann. Coenen et al. (2011) zeigen in diesem Zusammenhang, dass unter Variation der Verdichtungsmethode Asphalt-Probekörper mit vergleichbaren volumetrischen Eigenschaften erhalten werden, sich jedoch gleichzeitig maßgebende Unterschiede in den inneren Asphaltstrukturen, charakterisiert durch Kontaktpunkte und -längen des Traggerüsts, ergeben. Hunter et al. (2008) weisen ebenfalls den Einfluss unterschiedlicher Verdichtungsverfahren auf die entstehende innere Asphaltstruktur nach. Bedingt durch die variierende innere Asphaltstruktur werden darüber hinaus Unterschiede im Verformungsverhalten trotz gleicher volumetrischer Eigenschaften festgestellt.

Auf Grundlage dieser ersten Erkenntnisse ist eine Abhängigkeit zwischen der inneren Struktur des Asphalts und dem Gebrauchsverhalten des Asphaltes insgesamt zu erwarten. Hieraus ergibt sich zwingend die Notwendigkeit, neben den volumetrischen Asphaltkenngrößen die innere Struktur durch geeignete Strukturindizes zu beschreiben.

1.2 Ziel

Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zur Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur zu leisten, sowie den Zusammenhang zwischen der inneren Asphaltstruktur und dem Zusammenhalt des Asphaltes – charakterisiert beispielsweise durch das Ermüdungsverhalten oder den Verformungswiderstand des Asphaltes – zu untersuchen. Es soll gezeigt werden, dass auf Basis digitaler Bildauswertungen und -analysen die innere Asphaltstruktur verlässlich abgebildet

und anhand von zu definierenden Strukturindizes eine quantitative Bewertung dieser vorgenommen werden kann. Desweiteren soll die Frage beantwortet werden, ob beziehungsweise inwieweit die Viskosität des Asphaltmörtels einen Einfluss auf die resultierende innere Asphaltstruktur hat und zukünftig als eine "Stellschraube" zur Optimierung von Asphaltrezepturen im Hinblick auf ausgewählte Gebrauchseigenschaften dienen kann. Letztlich wird auch ein wichtiger Baustein zum Verständnis der Wirkungsmechanismen zwischen innerer Asphaltstruktur und resultierendem Materialverhalten unter zyklischer Zug- und Druckbelastung erarbeitet.

1.3 Untersuchungsmethodik

Es werden die nachfolgend aufgeführten Untersuchungsschritte durchgeführt:

1. Es wird eine Literaturstudie über die bisher entwickelten Ansätze zur Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur durchgeführt. Hierbei werden alle Methoden berücksichtigt, die eine Analyse der geometrischen Eigenschaften der Gesteinskörner, wie auch der resultierenden inneren Struktur des Baustoffgemisches Asphalt als Dreiphasen-Gemisch Gesteinskörnung, Asphaltmörtelphase und Hohlräume ermöglichen.
2. Auf Basis der Erkenntnisse aus der Literaturstudie wird ein geeignetes Verfahren zur Strukturcharakterisierung für die eigenen Untersuchungen ausgewählt und soweit angepasst, dass folgende Randbedingungen möglichst vollständig eingehalten werden:
 - Die Strukturcharakterisierung erfolgt mittels eines bildanalytischen Verfahrens.
 - Mit dem Verfahren zur Bildanalyse wird die innere Asphaltstruktur im Ganzen erfasst (Gesteinskörnung, Asphaltmörtelphase und Hohlräume).
 - Das Verfahren wird mit einem laborökonomisch vertretbarem Aufwand bei der Bilderfassung bezüglich Komplexität der Prüfeinrichtung, Zeitaufwand und Bedienbarkeit durchgeführt.
 - Bei der Bildanalyse werden die für die Kraftübertragung primär relevanten Strukturen identifiziert und entsprechend berücksichtigt.
 - Eine vollständige Neuentwicklung und Programmierung von Algorithmen für die Bildanalyse ist nicht vorgesehen.
 - Es werden vorhandene internationale Ansätze mit positivem Erfahrungshintergrund genutzt.
3. Von Querschnitten möglichst unterschiedlicher Asphaltarten /-sorten werden Bilder erfasst und zugehörige volumetrische Kennwerte bestimmt. Es werden Asphaltvarianten unter Variation der Asphaltschicht (Deckschicht und Asphaltbinderschicht), der Gesteinsart (Gabbro, Kalkstein), der Asphaltgranulatzugabe (mit vs. ohne) und der Additivzugabe (mit vs. ohne Wachsadditiv) vorgesehen.
4. Die erfassten Bilder der Asphaltquerschnitte werden einer digitalen Bildanalyse unterzogen und noch zu definierende Indizes gewonnen, die geeignet sind, die innere Asphaltstruktur hinreichend genau und zuverlässig abzubilden und eine quantifizierbare Bewertung ermöglichen.

5. An den bildtechnisch analysierten Asphaltvarianten werden ausgewählte Gebrauchseigenschaften prüftechnisch angesprochen. Um die Wirkungsmechanismen zwischen der inneren Asphaltstruktur und dem resultierenden Materialverhalten unter verschiedenen Randbedingungen zu untersuchen, werden Gebrauchseigenschaften berücksichtigt, die im Zusammenhang mit Zug- wie auch Druckbelastung stehen. Daher wird zum einen der Ermüdungswiderstand des Asphalt mittels Zug-Schwellversuch bestimmt. Da der Asphalt-Probekörper hierbei bis zum Bruch belastet wird, sollen daher ausschließlich Strukturindizes aus Bildern der unbelasteten Probekörper vor der Prüfung berücksichtigt werden. Zum anderen wird der Verformungswiderstand mittels Triaxialversuch bestimmt.
6. Die mittels Bilderfassung und -analyse gewonnenen Strukturindizes werden mit den Parametern der unterschiedlichen Versagensmechanismen (Ermüdung, Verformung) auf mögliche Zusammenhänge untersucht.
7. An ausgewählten Asphaltvarianten wird die Viskosität der entsprechenden Asphaltmörtelphase (Füller-Bitumen-Gemisch) mittels dynamischem Scherrheometer bestimmt, um einen möglichen Einfluss der Asphaltmörtelviskosität zu identifizieren.

2 Grundlagen und Stand der Technik zur Strukturanalyse

2.1 Digitale Bildanalyse

Unter den Begriff der „digitalen Bildanalyse“ fallen eine Reihe von Prozessen, die mit dem Ziel der Gewinnung von definierten Parametern aus einem Bild oder einer Serie von Bildern durchgeführt werden. Im Einzelnen wird zwischen den folgenden, grundlegenden Prozessen unterschieden (Erhardt, 2008):

- **Bildbearbeitung** (engl. *Image Enhancement*): Da die Bildqualität direkt nach der Aufnahme oftmals nicht ausreicht, um das Bild mittels einer rechnergestützten Auswertung weiter zu analysieren, ist die Bildqualität durch entsprechende Bildbearbeitungsalgorithmen (Filter, arithmetische und logische Bildoperatoren, Punktoperationen usw.) für den jeweiligen Anwendungsfall zu optimieren. Eine mangelnde Bildqualität liegt beispielsweise in Form von unzureichendem Kontrast (oftmals bei Röntgenbildern), Verzerrungen (Satellitenbilder) oder unscharfen Konturen von Objekten im Bild vor.
- **Bildtransformation** (engl. *Image Transform*): Ein Bildaufnahme, die direkt durch eine Kamera vorgenommen wurde, ist für das menschliche Sehvermögen bezüglich Darstellung, Aufnahmewinkel etc. meist optimal. Für eine rechnergestützte Analyse kann es von Vorteil sein, das Bild in anderen Raum zu überführen, ohne dabei Bildinformationen des Ursprungbildes zu ändern oder zu verlieren. Die Überführung eines Bildes in einen anderen Raum wird beispielsweise mittels Fouriertransformation in den Ortsfrequenzraum realisiert und verbessert das Analysepotential.
- **Bildauswertung** (engl. *Image Analysis*): Durch die Bildauswertung werden ausgewählte Parameter auf Basis der Bildinformationen extrahiert. Typische Parameter sind beispielsweise die Abmessung und Orientierung von Objekten. Weiterhin ist das Erstellen von Histogrammen (Häufigkeitsverteilungen) und Kennlinien Gegenstand der Bildauswertung. Die Ergebnisse der Auswertung liegen üblicherweise nicht als Bild vor, sondern werden als Bildbeschreibung in Bezug auf einen bestimmten Untersuchungsaspekt festgehalten.
- **Bildkompression** (engl. *Image Compression, Image Coding*): Hochauflösende Bilder bedingen einen hohen Speicherbedarf. Zur Reduzierung des Speicherbedarfs und zur effizienten Bildauswertung werden die Ursprungsbilder komprimiert, indem redundante Bildinformationen gelöscht werden.

Das Anwendungsfeld der digitalen Bildanalyse hat sich bis dato durch die rasante technische Entwicklung kontinuierlich ausgeweitet. Klassische Anwendungsgebiete sind unter anderem die Medizin (Computertomografie, Thermografie, Mikroskopie), die Meteorologie (Satellitenaufnahmen) oder die Kartographie (Identifikation von Erdformationen, Wasserläufen usw.). Es lassen sich folgende wissenschaftliche und technische Anwendungen der digitalen Bildanalyse zusammenfassen (Jähne, 2012):

- **Zählen und Vermessen:** Die Identifikation und das Zählen von Partikeln und Objekten, sowie die Bestimmung deren Größenverteilung ist eine äußerst weit verbreitete Anwendung. Praktisch jedes hergestellte (Industrie-)Produkt unterliegt heutzutage einem visuellen Inspektionssystem, dass automatisch das Produkt auf mögliche Defekte untersucht. Beispielhaft sei hier die optische Vermessung der Bauteilgröße und Lage der Teile genannt.
- **3 dimensionale Vermessung:** Ein Bild stellt grundsätzlich eine 2 dimensionale Projektion der realen 3 dimensional Situation dar. Mittels spezieller Aufnahmetechniken ist es möglich, die in den 2 dimensional Bildern verlorengewandene Tiefenschärfe zurückzugewinnen. Einen entscheidenden Anteil an der jüngeren Weiterentwicklung dieser Aufnahmetechniken zur Gewinnung von Volumenbildern haben die im medizinischen Bereich überwiegend angewandten tomographischen Verfahren. Mit Hilfe der Computertomografie (CT), der Magnetresonanztomografie (MRT), sowie der Positronenemissionstomografie (PET) können Bereiche des menschlichen Körpers 3 dimensional erfasst werden, die von völlig unterschiedlicher Beschaffenheit sind (Knochen, Gewebe, Verwachsungen etc.).
- **Analyse dynamischer Prozesse:** Die Bewegung ist ein wichtiges Merkmal, um spezielle Objekte identifizieren zu können. Bewegungen eines Objekts werden durch die Analyse von Bildsequenzen festgestellt. Die Analyse dynamischer Prozesse mittels bildgebender Verfahren findet auf äußerst unterschiedlichen Untersuchungsebenen statt. Es finden sich sowohl auf mikroskopischer Ebene (bspw. Untersuchung von molekularen Wirkungsmechanismen in Zellen) wie auch auf makroskopischer Ebene (Untersuchung der NO₂ Verteilung und deren Jahreszyklen in der Atmosphäre mittels Satellitenaufnahmen) entsprechende Anwendungsfelder.
- **Klassifizierung:** Wenn Objekte nach erfolgter Bildbearbeitung durch Filter im Bild identifiziert wurden, kann die Zuordnung der Objekte zu bestimmten Klassen erfolgen. Ein weit verbreitetes Beispiel einer Klassifizierungsaufgabe ist die Zeichenerkennung (optical character recognition – OCR). Hier erfolgt die Zuordnung der Lettern (Objekte) zur Kategorie Text (Klasse). Es wird letztlich für jeden einzelnen Bildpunkt entschieden, ob dieser zu einem Objekt gehört oder nicht (Segmentierung). Im Anschluss werden die Objekte anhand einer bestimmten Menge an bekannten Objektparametern (für Text ist dies beispielsweise das Merkmal Form der einzelnen Lettern) einer Klasse zugeordnet.

Der erste Schritt im Rahmen einer digitalen Bildanalyse ist zunächst die Bildgewinnung. Im folgenden Kapitel 2.1.1 werden die verschiedenen Methoden zur Bildgewinnung detaillierter erläutert. Hierbei stehen insbesondere die Digitalbilddaufnahme (2 dimensionale Bildgewinnung) und die Tomographie (3 dimensionale Bildgewinnung) im Fokus, da vornehmlich diese Methoden im Rahmen der Strukturanalyse von Asphalt Anwendung finden (vgl. Kapitel 2.1.3.2)

2.1.1 Bildgewinnung

Im Rahmen einer digitalen Bildanalyse hängt die Qualität der Analyseergebnisse entscheidend von der richtigen Wahl des Verfahrens ab, das zur Bildgewinnung eingesetzt wird. Das bildgebende Verfahren sollte stets optimiert und an die interessierenden Parameter, die aus dem Bild gewonnen werden sollen, angepasst werden. Grundsätzlich gilt, dass die höchste Qualität durch ein optimal an den Analysezweck angepasstes Bildaufnahmesystem erreicht wird, während die Qualitätsverbesserung durch nachträgliche Bildbearbeitungsalgorithmen nur noch suboptimale Ergebnisse liefert.

Grundsätzlich misst das Bildaufnahmesystem die vom aufgenommenen Objekt ausgesandte Strahlung und macht diese sichtbar. Die Strahlung liegt dabei in unterschiedlicher Form vor, nämlich entweder als Fluss von Partikeln, akustische Wellen oder elektromagnetische Strahlung. Ein optimales Bildaufnahmesystem bildet das interessierende Objekt möglichst einfach ab, blendet dabei die durch andere Parameter verursachten Störeinflüsse weitestgehend aus und stellt eine eindeutige Funktion zwischen gemessener Strahlung und der Eigenschaft des Objekts her. Dazu muss die Anordnung der Komponenten des Bildaufnahmesystems gewährleisten, dass die Störeinflüsse minimiert und die vom Objekt emittierte Strahlung korrekt eindeutig identifiziert und wiedergegeben wird (Jähne, 2012).

Die Komplexität des Bildaufnahmesystems hängt von der Fragestellung ab, welche Eigenschaften der Objekte im Bild untersucht werden sollen. Ist beispielsweise nur die exakte geometrische Vermessung der Objekte von Interesse, reicht die klare Abgrenzung dieser Objekte vom Hintergrund des Bildes durch entsprechende Beleuchtung aus. Sollen darüber hinaus Materialeigenschaften (beispielsweise Dichte oder Temperatur) der Objekte analysiert werden, so muss auf Basis von radiometrischen Grundlagen ein eindeutiger quantitativer Zusammenhang zwischen der emittierten Strahlung und den Materialeigenschaften bekannt sein beziehungsweise hergestellt werden. Die emittierte Strahlung eines Objekts kann folgende Informationen tragen (Jähne, 2012):

- Intensität (gibt die Helligkeit des Objekts im Bild wieder),
- Phasenlage (gibt die Verschiebung einzelner Wellen innerhalb eines Wellenzuges wieder und ist für bestimmte Materialeigenschaften charakteristisch),
- Polarisationszustand (ermöglicht eine exaktere Charakterisierung der Welle mittels der Phasenlage und Amplitude im 3 dimensionalen Raum),
- Frequenz beziehungsweise Wellenlänge (gibt zusätzliche Information über die Materialeigenschaft des Objekts wieder unter Berücksichtigung von Effekten wie beispielsweise Streuung, Absorption oder Lumineszenz).

Der Aufbau eines optimalen Bildaufnahmesystems gelingt, wenn bekannt ist, welche Parameter die „Helligkeit“ des interessierenden Objekts beeinflussen.

(a) 2 dimensionale Bilderfassung

Bildaufnahmesysteme die auf 2 dimensionaler Ebene arbeiten, bestehen üblicherweise aus folgenden Elementen (Erhardt, 2008):

1. Beleuchtungsanlage (häufig in Form einer dem Untersuchungszweck angepassten Leuchtquelle wie bspw. LED),
2. Sensoreinheit (detektiert elektromagnetische Strahlung und wandelt diese in entsprechende Signale für den Bildspeicher um),
3. ein für die Problemstellung angepasstes Objektiv (Objektivformat sollte größer oder gleich dem Chipformat der Sensoreinheit sein),
4. Bildverarbeitungskarte (verarbeitet die von der Sensoreinheit gelieferten Signale und stellt Bildinformationen speichereffizient und schnell auf einer benutzerorientierten interaktiven Oberfläche dar),
5. Peripherie zur Ausgabe des Bildes (Monitor, Drucker, Datenschnittstelle, usw.).

Die auf dem Markt befindlichen höherwertigen Digitalkameras stellen quasi ein komplettes Bildaufnahmesystem dar, dass die oben genannten Elemente bereits aufeinander abgestimmt und in kompakter Form integriert.

Von zentraler Bedeutung ist die Sensoreinheit des Bildaufnahmesystems. Daher wird im Folgenden kurz der grundsätzliche Aufbau einer Sensoreinheit beschrieben. Je nach Aufgabenbereich unterscheidet sich die Sensoreinheit bezüglich Aufnahmegeschwindigkeit, Auflösung, spektraler Empfindlichkeit und Sensorik. Je nach Empfindlichkeitsbereich werden Bildsensoren für unterschiedliche Strahlungsarten eingesetzt (Erhard, 2008):

- Strahlung des sichtbaren Bereichs,
- Röntgenstrahlung,
- Ultraviolette Strahlung (UV),
- Infrarotstrahlung (IR),
- Radiowellen, usw.

Ein Bildsensor besteht aus vielen lichtempfindlichen Halbleiterelementen (Pixeln), die in Zeilen oder in einer Matrix angeordnet sind. Die einfallende Strahlung trifft auf die Pixel wodurch eine Ladung erzeugt wird, die je nach Strahlungsintensität akkumuliert wird. Aufgrund der ladungsgekoppelten Funktionsweise werden diese Sensoren als CCD-Sensoren bezeichnet (engl. Charged-Coupled Device). Das so entstandene Ladungspaket wird durch analoge Schieberegister an den Rand des Sensors transportiert und dort verstärkt und ausgelesen (Jähne, 2012), (Abbildung 2).

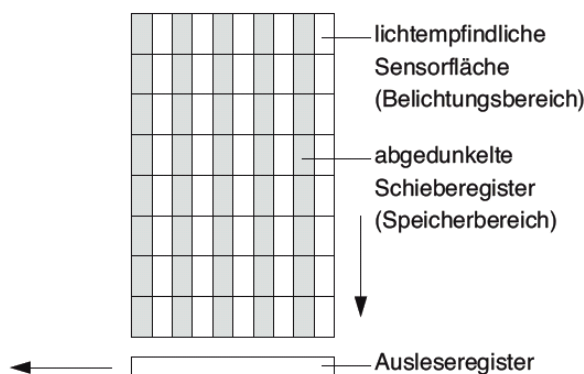


Abbildung 2. Funktionsweise eines ladungsgekoppelten lichtempfindlichen Bildsensors (CCD), (Jähne, 2012).

CCD-Sensoren sind je nach Bauart in der Lage, den gesamten Spektralbereich zwischen UV- und IR-Bereich zu erfassen. CCD Sensoren finden weite Verbreitung, weisen aber zwei gravierende Nachteile auf. Zum einen kommt es bei einer lokalen Überbelichtung (bspw. bei einem sehr hellen Objekt vor dunklem Hintergrund) zu einer Überladung des einzelnen Pixels. In der Folge breitet sich diese Überladung in die benachbarten Pixel aus, resultierend in einem hellen Fleck auf dem Bild. Die entsprechende Bildinformation geht an dieser Stelle verloren. Zum anderen sind der Geschwindigkeit der Datenübertragung aufgrund des seriellen Auslesens der Pixel Grenzen gesetzt, was zum Beispiel die Verwendung von CCD-Sensoren für Aufnahmen mit sehr hoher Bildrate unmöglich macht (Erhardt, 2008).

Durch die Weiterentwicklung des CCD Sensors hin zum APS (engl. active pixel sensor) wurde den genannten Nachteilen begegnet. Durch die Ansteuerung und parallele Auslesung jedes Pixels erhöht sich die Auslesegeschwindigkeit. Durch die Integration weiterer Schaltkreise auf dem Bildsensor werden vermehrt Funktionen wie Belichtungskontrolle oder Kontrastkorrektur direkt vom Sensorchip übernommen (Jähne, 2012).

(b) 3 dimensionale Bilderfassung

Im Rahmen der 2 dimensional Bilderfassung werden für jeden Bildpunkt die „Helligkeit“ und die Lage in der 2 dimensional Ebene gespeichert. Für eine 3 dimensionale Bilderfassung wird für jeden Bildpunkt zusätzlich die Information über dessen Tiefe benötigt. Im Folgenden werden die grundlegenden Prinzipien zur Bestimmung der Tiefe genannt (Jähne, 2012):

1. **Tiefe aus Triangulation:** In der Geodäsie ist die Triangulation eine der wichtigsten Techniken zur Abstandsmessung. Dabei wird ein Objekt aus mindestens 2 Positionen betrachtet, wodurch sich Aufnahmen des Objekts aus 2 verschiedenen Blickwinkeln ergeben. Hierdurch ist es möglich, die Entfernung zwischen Objekt und Bilderfassungssystem mathematisch zu ermitteln. Ein Bilderfassungssystem mit 2 Bildsensoren (z. B. zwei Kameras mit parallelen Optiken) wird als Stereosystem bezeichnet. Das Tiefensehen mittels eines solchen Stereosystems liegt praktisch allen biologischen Systemen zu Grunde (Tiefensehen durch 2 Augen). Die Genauigkeit der Tiefenbestimmung hängt dabei mit der Entfernung zwischen Objekt und Kamera zusammen. Die Genauigkeit nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Die Darstellung der Tiefeninformation wird durch die Überlagerung der beiden Teilbilder in unterschiedlichen Farben (meist rot und grün) realisiert. Erfolgt diese Bildüberlagerung mit einer Brille mit einem Rotfilter auf der einen Seite und einem Grünfilter auf der anderen Seite, wird je Auge auch nur das entsprechend nicht gefilterte Teilbild wahrgenommen. Das menschliche Gehirn kann so die Entfernung zum Objekt ermitteln und die Szene 3 dimensional wahrnehmen. Es können auch Prismenbrillen verwendet werden, die das Bild des einen Auges nach oben und das Bild des anderen Auges nach unten ablenken. Weiterhin können 3 dimensionale Bilder durch Polarisation dargestellt werden, indem das Objekt unter unterschiedlich polarisiertem Licht aufgenommen und durch eine Polarisationsbrille betrachtet wird (Lorenz, 1985).

2. **Tiefe aus Fokussierung:** Im Prinzip beruht die Bestimmung der Tiefe aus Fokussierung wiederum auf Triangulation. Jedoch ist die Triangulationsbasis hier nicht der Abstand zwischen zwei Kameras, sondern der Durchmesser der Optik. Das Objekt kann nur in einem bestimmten Fokusbereich scharf dargestellt werden. Wird dieser Bereich verlassen, nimmt der Kontrast der Ecken und Kanten ab und das Bild verschwimmt. Für jeden Bildpunkt wird die Fokussierung mit dem maximalen Kontrast bestimmt und einem entsprechenden Tiefenwert zugeordnet. Diese Methode eignet sich besonders für die Tiefenbestimmung von undurchsichtigen Oberflächen.
3. **Tiefe aus Mehrfach-Projektionen (Tomografie):** Tomografische Verfahren sind als Erweiterung der Stereoskopie zu verstehen. Während die Stereoskopie lediglich die Tiefenbestimmung von undurchsichtigen Oberflächen zulässt, lässt sich mittels Tomografie die 3-Gestalt auch von durchsichtigen Objekten bestimmen. Grundprinzip der Tomografie ist das schichtweise Durchstrahlen des Objektes aus unterschiedlichen Richtungen. Die Projektion der Strahlung nach Durchlaufen des Objektes wird auf einem Bildschirm dargestellt. Gemessen wird der Intensitätsverlust der Strahlung, der in Abhängigkeit der Objektstruktur und dessen Eigenschaften (bspw. materialspezifisches Absorptionsvermögen) steht. Durch das Zusammensetzen der einzelnen Projektionen aus allen Richtungen ergibt sich ein 3 dimensionales Abbild des Objekts.
4. **Tiefe aus Laufzeit:** Die Laufzeit des vom Bildsensor ausgehenden und vom Objekt reflektierten Signals wird bestimmt. Die Laufzeit ist dabei proportional zur Entfernung der einzelnen Punkte des Objekts und des Bildsensors.
5. **Tiefe aus Phase:** Als Spezialfall der Laufzeitmessung gilt die Interferometrie. Dabei wird nicht nur die Laufzeit des Signals in Form der Amplitude der Strahlung, sondern auch die Phasenverschiebung der Signalwelle bestimmt. Diese Messmethode eignet sich besonders zur Bestimmung von extrem kleinen Distanzen im Nanometerbereich.
6. **Tiefe aus der Messung der Oberflächenneigung:** Die Messung der Oberflächenneigung erfolgt mittels Beleuchtung des Objekts und der Analyse des resultierenden Schattenwurfs. Die Oberflächenneigung in Form des Winkels zur Senkrechten steht im Zusammenhang mit der Strahlungsstärke der Oberfläche und der Richtung der Beleuchtung. Eine direkte Messung der Tiefe ist nicht möglich, sondern wird rechnerisch durch Integration der Oberflächenneigungen der einzelnen Objektpunkte ermittelt. Es können keine absoluten Distanzen bestimmt werden. Wegen dieser Limitierungen hat diese Messmethode bisher so gut wie keine praktische Anwendung gefunden.

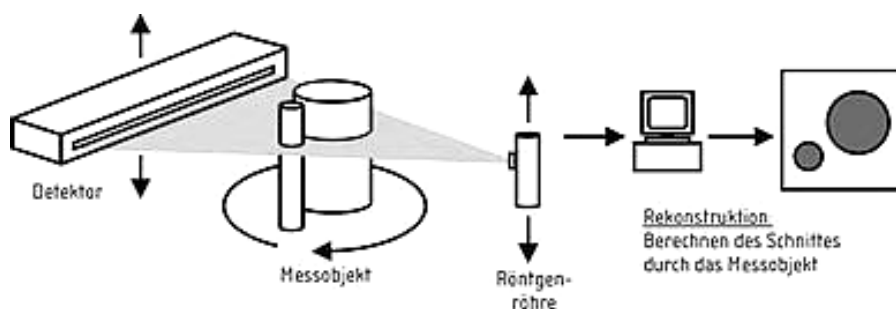


Abbildung 3. Prinzip der Tomografie zur 3-dimensionalen Bilderfassung am Beispiel der Röntgentomografie (o. A., 2016).

Grundsätzlich ermöglichen die Methoden zur 3 dimensionalen Bilderfassung die Struktur eines Objekts präzise zu charakterisieren und durch eine anschließende Analyse durch entsprechende Kennwerte zu quantifizieren. Jedoch sind der prüftechnische, der zeitliche und der finanzielle Aufwand im Vergleich zu Methoden der 2 dimensionalen Bilderfassung ungleich höher. Für den jeweiligen Anwendungsfall ist daher immer abzuwägen, ob der hohe Aufwand zur 3 dimensionalen Bilderfassung zwingend notwendig ist, um eine für den Anwendungszweck ausreichende Bildqualität für die anschließende Analyse zu gewinnen.

Werden Bildanalysen im Rahmen der Strukturanalyse von Asphalten eingesetzt (vgl. Kapitel 2.1.3.2), hängt die Entscheidung ob eine 3 dimensionale oder 2 dimensionale Bilderfassung notwendig ist davon ab, ob anhand der Bildinformationen ein möglichst genaues Modell (beispielsweise im Rahmen einer FE-Modellierung der inneren Struktur des Asphalts) das Ziel der Bildanalyse ist, oder ob ein laborökonomisch sinnvolles Verfahren zur relativ schnellen Strukturcharakterisierung mittels einfacher Methoden angewandt werden soll.

Letztlich bieten auch Methoden der 2 dimensionalen Bilderfassung die Möglichkeit, eine 3 dimensionale Struktur hinreichend genau zu beschreiben. Dazu ist das Objekt schichtenweise durch Schnitte zu trennen und vom jeweiligen Schnitt eine 2 dimensionale Aufnahme zu erstellen. Dies ist im Falle von Asphalt-Probekörpern grundsätzlich möglich, jedoch nur an Probekörpern, die bereits einer Prüfung unterzogen wurden. Eine mögliche Strukturveränderung durch den Lasteintrag aus der Prüfung kann so nicht untersucht werden.

2.1.2 Bildverarbeitung

Im Rahmen der Bildverarbeitung wird das Ursprungsbild (Eingangsbild) mittels diverser Operationen (Transformation und Operatoren) so verändert, dass es für die anschließende Analyse bezüglich seines Informationsgehalts optimiert wird. Allen Operationen ist gemein, dass das Eingangsbild in ein oder mehrere Ausgangsbilder transformiert wird, wobei das Ausgangsbild nicht zwangsläufig für das menschliche Auge zusätzliche Informationen liefern muss. Vielmehr ist das Ausgangsbild als Bildbeschreibung definiert, die bestimmte Bildinformationen durch Modifikation der Ausgangswerte enthält (Abbildung 4). So bewirkt beispielsweise die Umwandlung des Eingangsbildes in ein Binärbild (ausschließlich weiße und schwarze Bildpunkte) ein rein visuell informationsärmeres Bild, jedoch ist dies für eine spätere Kantendetektion zwingend notwendig.

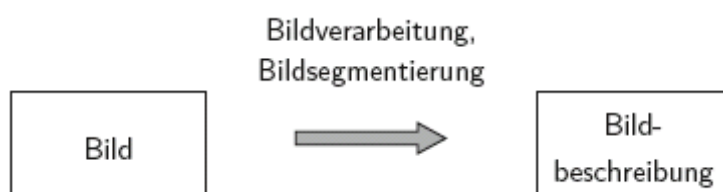


Abbildung 4. Überführung des Eingangsbildes mittels Verarbeitung von 2 dimensionalen Bildelementen (Kanten, Segmenten) in eine Bildbeschreibung (in Anlehnung an Steinmüller, 2008).

In Bezug auf die Operationen wird grundsätzlich in Punktoperationen, lokale und globale Operationen unterschieden (Steinmüller, 2008). Punktoperationen verändern pixelweise die Grauwerte beziehungsweise Farbwerte des Eingangsbildes. Ziel ist es, dass Bild für den

menschlichen Betrachter zu optimieren (bspw. durch Glättung, Schärfung, etc.). Diese Art der Operationen verändert nicht die Informationsdichte des Bildes, das heißt die Anzahl der Grauwerte bleibt konstant (Erhardt, 2008). Lokale Operationen beziehen die Umgebung jedes Pixels mit in die Berechnungen ein. Dies ist bei gängigen Filteralgorithmen der Fall. Bei globalen Operationen ist der Bildpunkt des Ausgangsbildes eine Funktion aller Bildpunkte des Eingangsbildes.

Im Folgenden werden ausgewählte Operationen im Rahmen der Bildverarbeitung genannt:

- Bildoptimierung, Korrektur von Bildfehlern durch
 - Punktoperationen,
 - arithmetische und logische Bildverknüpfungen,
 - lineare Filteroperationen,
- Kantendetektion,
- Finden von homogenen Bildbereichen / Bildsegmentierung.

(a) Bildoptimierung durch Punktoperationen

Punktoperationen dienen der Bildverbesserung durch beispielsweise Kontrastdehnungen und -verstärkungen, Optimierung der Beleuchtung, Korrektur von inhomogener Beleuchtung oder von optischen Verzerrungen durch die Aufnahmeoptik.

Punktoperationen weisen auf Basis von sogenannten Skalierungsfunktionen $f(g_i)$ jedem Pixel des Eingangsbildes einen neuen Grauwert g_i' zu (Erhardt, 2008). Die allgemeine Skalierungsfunktion

$$g_i' = f(g_i) \qquad \text{Gl. 1}$$

mit:

g_i : alter Grauwert,

g_i' : neuer Grauwert.

kann dabei jede denkbare Form annehmen, die für den jeweiligen Analysezweck sinnvoll erscheint. Üblicherweise liegt für Grauwerte ein Wertebereich zwischen 0 (schwarz) bis 255 (weiß) zu Grunde. In Abbildung 5 ist ein Beispiel für die einfachste Form der Grauwertkorrektur, die sog. Invertierung dargestellt. Hierbei wird die Reihenfolge der Grauwerte umgekehrt, wodurch ein „Negativ“ vom Eingangsbild erzeugt wird.

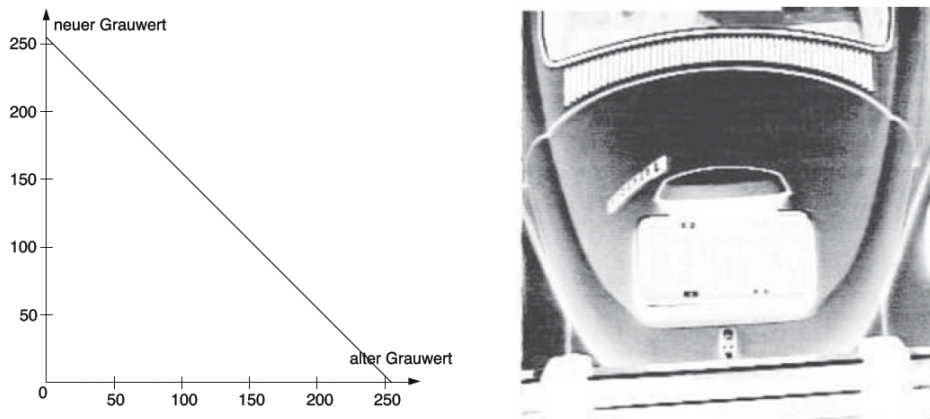


Abbildung 5. Invertierung des Eingangsbildes vom hinteren Fahrzeugteil eines VW Käfers als einfachste Punktoperation im Rahmen der Bildoptimierung (Erhard, 2008).

Suboptimal beleuchtete Bildbereiche in Form über- oder unterbelichteter Bereiche sind nicht immer visuell erkennbar. Als wichtiges Hilfsinstrument wird daher die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte (Histogramm) herangezogen. Mittels solcher Histogramme lassen sich kontrastarme Bildbereiche visualisieren und quantifizieren. Das beispielhafte Histogramm zeigt, dass das Bild lediglich einen kleinen Grauwertbereich im unteren (dunkleren) abdeckt (vgl. Abbildung 6, b). Eine Kontraststärkung wird dann beispielsweise mittels einer Punktoperation erreicht, die alle Grauwerte unterhalb des Schwellwertes, in diesem Fall zirka 64 auf den vollen Kontrastbereich ausdehnt (neuer Grauwert = $4 \times$ alter Grauwert, vgl. Abbildung 6, c). Die Bildqualität wird hierdurch nicht verbessert, da keine neuen Bildinformationen erzeugt werden. Eine solche Punktoperation dient lediglich einem verbessertem visuellen Eindruck des Bildes.

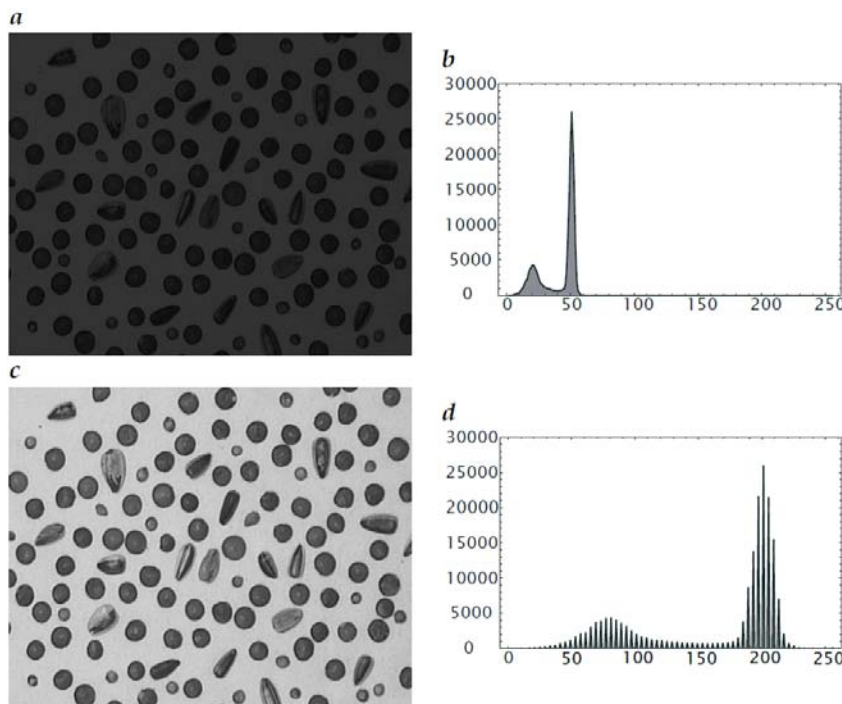


Abbildung 6. Kontraststärkung des ursprünglichen Bildes (a) durch Aufweitung des ursprünglichen Graubereichs (b) auf den vollen Kontrastbereich (d) mittels einer Punktoperation mit dem Ergebnis eines kontraststarken Ausgangsbildes (c), (Jähne, 2012).

(b) Bildoptimierung durch arithmetische und logische Bildverknüpfungen

Digitale Bilder liegen in Matrizenform vor und können deshalb denselben mathematischen Operationen wie Matrizen unterzogen werden. Es ist daher möglich, Bildverknüpfungen vorzunehmen, die zwei oder mehrere Eingangsbilder zu einem Ergebnisbild verarbeiten. Dies geschieht durch Addition, Subtraktion, Multiplikation oder logische Verknüpfungen zwischen den Pixeln der einzelnen Bilder.

Die wichtigsten arithmetischen Operationen für Bildverknüpfungen sind (Erhardt, 2008):

- **Mittelung:** Der Mittelwert des Grauwertes jedes Pixel wird gebildet, um fehlerhafte Bildbereiche (z. B. Rauschen) zu beseitigen. Moderne Bildaufnahmesysteme integrieren diese Funktion bereits während der Bildaufnahme.
- **Differenzbildung:** Durch die pixelweise Subtraktion werden Unterschiede zwischen zwei Bildern deutlich gemacht. Dies ist beispielsweise für eine Bildsegmentierung notwendig, bei der ausgewählte Strukturen vom Rest des Bildes separiert dargestellt werden. Abbildung 7 zeigt eine Bildsegmentierung durch Differenzbildung zwischen zwei unterschiedlich fokussierten Bildern, resultierend in einer Segmentierung der Blutgefäße im menschlichen Auge. Weiterhin wird Differenzbildung eingesetzt, um Bewegungen oder Veränderungen in Bildfolgen zu identifizieren. In der Mikroskopie werden störende Beleuchtungseinflüsse eliminiert, indem die Differenz zwischen dem Bild von der Beleuchtung ohne Präparat und dem Bild vom beleuchteten Präparat gebildet wird.
- **Multiplikation und Division:** Diese Operationen werden zur Transformation eines Bildes (Darstellung im Ortsraum durch den Grauwert an einem jeweiligen bestimmten Ort) in den Ortsfrequenzraum (Zerlegung des Bildes in ein Betrags- und ein Frequenzbild) mittels Fouriertransformation. Notwendig sind solche Transformationen zur Analyse und Manipulation der Bildfrequenzen, zur Datenkompression oder auch zur effizienteren Anwendung von Filtertechniken.
- **Logische Operationen:** Durch Verknüpfungen von Einzelbildern durch UND-Funktionen (Pixel des Ergebnisbildes wird nur dargestellt, wenn entsprechende Pixel in den Eingangsbildern gesetzt sind) lassen sich bestimmte Bildbereiche ausblenden oder bestimmte Bildebenen visualisiert.

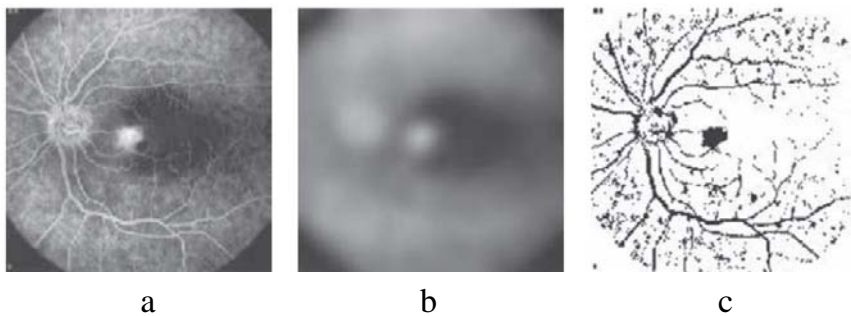


Abbildung 7. Visualisierung von Blutgefäßen im menschlichen Auge (c) durch Differenzbildung zwischen zwei unterschiedlich fokussierten Bildern (a und b), (Erhardt, 2008).

(c) Bildoptimierung durch lineare Filteroperationen

Im Gegensatz zu Punktoperationen beziehen Filteroperationen – oder auch als Nachbarschaftsoperationen bezeichnet – die Umgebung eines Pixels mit ein. Dadurch benötigen Filteroperationen im Allgemeinen deutlich mehr Rechenkapazität beziehungsweise -zeit (Erhardt, 2008).

Filteroperationen sind das grundlegende Werkzeug, um beispielsweise im Rahmen der Bildanalyse Objekte, Kanten, Linien und Oberflächen im Bild zu identifizieren und zu detektieren oder auch Texturen zu analysieren. Weiterhin sind wichtige Anwendungen von Filteroperationen (Jähne, 2012):

- Identifizierung und Quantifizierung von Bewegungen in Bildfolgen,
- Rekonstruktion von 3 dimensional Bildern, die mittels tomografischer Verfahren gewonnen werden,
- Bildrestaurierung zur Beseitigung von Störeinflüssen durch fehlerhafte Fokussierung, Unschärfen, etc.

Häufig angewendet werden Filter zu Glättung eines Bildes. Tiefpassfilter in Form von Mittelwertfiltern oder Gaußfiltern entfernen extreme Grauwerte, sowie Rauschen im Bild. Diese Extremwerte führen bei der Transformation in den Ortsfrequenzraum zu hochfrequenten Anteilen, die eine anschließende Bildanalyse erschweren. Durch Tiefpassfilter werden die hochfrequenten Anteile entfernt, es verbleiben im Ergebnisbild lediglich die niederfrequenten Anteile. Im Gegensatz zu Tiefpassfiltern stellen Hochpassfilter die hochfrequenten Bildanteile auf Basis von Ableitungen des Eingangsbildes in unterschiedlicher Richtung und Gewichtung heraus. Dies ist besonders für die Kantendetektion notwendig. Gradientenfilter operieren mit der 1. Ableitung, während Laplace-Filter auf der 2. Ableitung beruhen (Erhardt, 2008).

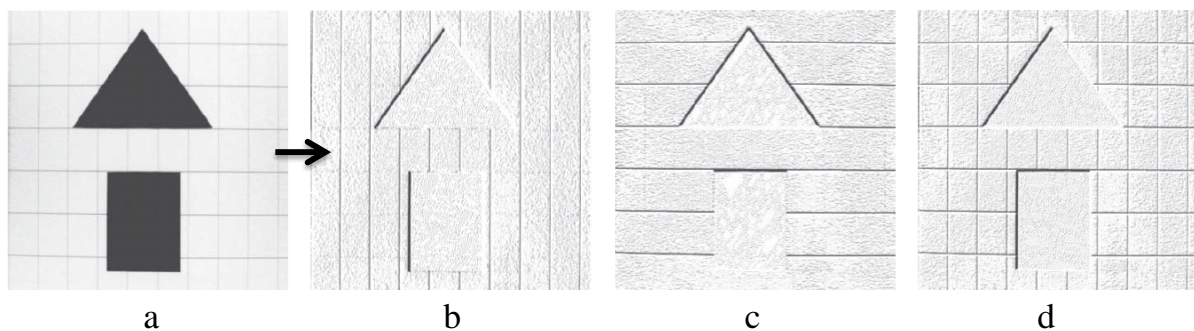


Abbildung 8. Anwendung von Hochpassfiltern zur Kantendetektion. Im Eingangsbild (a) werden mittels in verschiedenen Richtungen angewendeten Gradientenfiltern Kanten detektiert; Ergebnis nach Anwendung des Gradientenfilters von links nach rechts (b), von oben nach unten (c) und links oben nach rechts unten (d).

(d) Kantendetektion

Um Kanten zu detektieren, sind zum einen homogene Bildbereiche (konstante Grauwerte) zu unterdrücken und gleichzeitig lokal starke Grauwertänderungen durch entsprechende Nachbarschaftsoperatoren (Kantenfilter) zu detektieren (vgl. beispielsweise Hochpassfilter im vorangegangenen Abschnitt). Um Kanten zu detektieren, muss zunächst mathematisch definiert sein, was eine Kante ist und ein Maß für die Kantenstärke festgelegt werden. In 2-dimensionalen Bildern stellen Kanten jene Bildbereiche dar, bei denen die Steigung der Grauwerte Extremwerte aufweisen, mathematisch also die 1. Ableitung positive oder negative Extremwerte annimmt. Die 2. Ableitung weist entsprechend einen Nulldurchgang in diesen Stellen auf. Das Maß für die Kantenstärke ist für die Optimierung der Kantendetektion von entscheidender Bedeutung. Nur wenn die Kantenstärke ein objektives Konfidenzmaß liefert, können die Ergebnisse unterschiedlicher Nachbarschaftsoperatoren miteinander verglichen und eine optimale Kantendetektion erreicht werden (Jähne, 2012).

Über die Entwicklung von Kantenfiltern existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen, in denen im Detail die Funktionsweise, sowie die filterspezifischen Vor- und Nachteile behandelt werden.

Filteroperationen zur Kantendetektion sind ein Element bei der Strukturcharakterisierung von Asphalt im Rahmen dieser Arbeit, die Funktionsweise an sich steht aber nicht im Fokus. Daher wird an dieser Stelle lediglich auf einige Schlüsselpublikationen hingewiesen.

Auf die Entwicklung der Kantendetektion auf Basis von Ableitungen der Gaußfunktion geht Canny (1986) ein, während Deriche (1990) eine schnellere Lösung durch die Implementierung eines rekursiven Filters erreicht. Lanser et al. (1991) stellen eine Weiterentwicklung dieser Lösung vor. Grundlegende Arbeiten zur Kantendetektion mittels Differenzfiltern 2. Ordnung (Nulldurchgänge) wurden von Marr et al. (1982, 1980) auf dem Gebiet biologischer Sehsysteme publiziert.

Allgemeine Eigenschaften der Filteroperationen zur Kantendetektion sind (Jähne, 2012):

- Verschiebungsfreiheit: Kantenfilter dürfen zu keiner Verschiebung der Objekte zwischen Eingangsbild und Bildbeschreibung führen,
- Unterdrückung des Mittelwertes: Kantenfilter dürfen keinen mathematischen Wert als Antwort auf einen konstanten Wert im Eingangsbild geben,
- Symmetrie: Filtermasken müssen in Abhängigkeit von der Ableitungsordnung entweder asymmetrisch für Ableitungsfilter 1. Ordnung oder symmetrisch für Ableitungsfilter 2. Ordnung sein, damit eine effiziente Anwendung gewährleistet ist,
- Isotropie: Kantenfilter dürfen nicht richtungsabhängig funktionieren. Die Kante muss unabhängig von ihrer Richtung detektiert werden können.

Nach der Optimierung der Bildqualität und nach ersten Ansätzen zur Objekterkennung mittels Punkt- oder Filteroperationen (vgl. vorangegangene Abschnitte (a) bis (d)) ist für eine Bildanalyse die Zuordnung der einzelnen Bildpunkte zu Objekten und damit eine Segmentierung des Bildes notwendig. Das Ergebnis der Bildsegmentierung ist letztlich ein Binärbild, in dem jedem Pixel entweder der Wert 0 (gehört nicht zum Objekt) oder der Wert 1 (gehört zum Ob-

jekt) zugeordnet ist. Das Bild kann hierdurch in Regionen eingeteilt werden, die Ränder der Region stellen dabei die Diskontinuitäten (z. B. Kanten) von Objekten dar. Auf Basis der Bildsegmentierung lässt sich im Weiteren auch die Objektform näher analysieren beziehungsweise charakterisieren.

Die Verfahren zur Bildsegmentierung werden eingeteilt in (Jähne, 2012; Steinmüller, 2008):

- **Pixelbasierte Segmentierung:** Bei der pixelweisen Zuordnung in Segmente auf Basis von Schwellwerten, ist eine korrekte Schwellwertermittlung kritisch für eine korrekte Segmentierung, insbesondere bei der Bestimmung von geometrischen Objekteigenschaften. Im Falle von symmetrischen Kanten ist der optimale Schwellwert der mittlere Grauwert aus Hintergrund und Objekt.
- **Kantenbasierte Segmentierung:** Wenn inhomogene Hintergrundbeleuchtung vorliegt oder die Objekte nicht einen einheitlichen Grauwertbereich aufweisen, führt eine pixelweise Segmentierung zu Fehlern. So werden beispielsweise bei dunklem Hintergrund weniger helle Objekte grundsätzlich zu klein detektiert. Auf Basis von lokalen Maxima des Grauwertgradienten lassen sich Kanten detektieren. Die Segmentierung wird anschließend mittels einer Kantenverfolgung realisiert. Lokale Maxima einer Region werden solange verfolgt, bis der Ausgangspunkt und damit der Umriss des Objekts identifiziert ist.
- **Regionenbasierte Segmentierung:** Das Grundprinzip der regionenbasierten Segmentierung ist die Betrachtung einer Menge an benachbarten Pixeln und die Entscheidung, welche Punkte dieses Betrachtungsfeldes zu einer Region zusammengefasst werden können. Die Entscheidung wird mittels eines Ähnlichkeitsmaßes getroffen. Ein weit verbreitetes Verfahren ist das Bereichswachstumsverfahren (Seed-Region-Growing), das ausgehend von einem Keimpunkt durch iteratives Wachstum eine Region definiert. Der Keimpunkt kann zu Beginn aus nur einem Pixel bestehen. Die umgebenden Pixel werden der Region zugeordnet, solange der Schwellwert des Ähnlichkeitsmaßes noch nicht erreicht ist. Diese Operation wird solange iterativ durchgeführt, bis keine Verschmelzung der benachbarten Pixel mit der Region mehr möglich ist. Das Bereichswachstumsverfahren ist sensibel bezüglich der geeigneten Wahl der Keimpunkte. Häufig ist eine automatische Wahl von Keimpunkten ohne Vorkenntnisse über Objekte im Bild nicht möglich. Desweiteren kann es zur Überlappung von Regionen durch Auslaufen und Verschmelzen (Chaining Effekt) kommen. Verfahren der regionenbasierten Segmentierung sind generell anfällig für Über- beziehungsweise Untersegmentierung. Übersegmentierung liegt vor, wenn ein Objekt verschiedenen Regionen zugeordnet wurde, wohingegen bei der Untersegmentierung verschiedene Objekte in einer Region zusammengefasst wurden. Das Maß der Über- und Untersegmentierung hängt direkt von der Wahl des Ähnlichkeitsmaßes ab. Die Verwendung eines globalen Schwellwertes als Ähnlichkeitsmaß macht es jedoch praktisch unmöglich, Segmentierung ohne über- oder untersegmentierte Anteile zu erhalten (Lange, 1999).
- **Modellbasierte Segmentierung:** Sofern die exakte Form der Objekte in einem Bild bereits vor der Bildverarbeitung bekannt ist, lässt sich eine modellbasierte Segmentie-

rung vornehmen. Das Modell, das als Grundlage für die Segmentierung dient, besteht aus Beispielsegmentierungen, gewonnen durch Trainingsdaten. Anhand der Beispielsegmentierungen werden dann iterativ die vorhandenen Bilddaten ausgewertet. Die modellbasierte Segmentierung wird für die Strukturcharakterisierung von Asphalt im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet. Daher erfolgt an dieser Stelle keine detaillierte Darstellung des Verfahrens.

Die referierten Verfahren zur Bildsegmentierung stellen bereits an sich erste Schritte zur Bildanalyse dar. Letztlich ist eine strikte Unterscheidung zwischen Verfahren der Bildverarbeitung und Bildanalyse nicht möglich, da zur Bildanalyse logischerweise das Bild verarbeitet werden muss. Im folgenden Abschnitt 2.1.3 werden weitergehende Grundlagen zur Bildanalyse und -auswertung erläutert.

2.1.3 Bildanalyse und -auswertung

Ausgehend vom Ursprungsbild können durch unterschiedliche Operationen bestimmte Bildinformationen durch Modifikation der Ausgangswerte ergänzt werden (vgl. Abschnitt 2.1.2). Dadurch wird das Ausgangsbild optimiert und in seinen Eigenschaften genauer definiert, beziehungsweise beschrieben. Daher wird als Resultat der Bildverarbeitung auch von der Bildbeschreibung gesprochen.

Die Bildbeschreibung allein reicht jedoch nicht aus, wenn Informationen zur einer bestimmten Struktur und dessen spezifische Charakterisierung oder gar Quantifizierung dieser Struktur innerhalb des Bildes gewonnen werden sollen. Dazu ist eine Bildanalyse auf Basis einer Objekterkennung notwendig, wodurch die Bildbeschreibung in eine Szenenbeschreibung überführt wird (Abbildung 9).

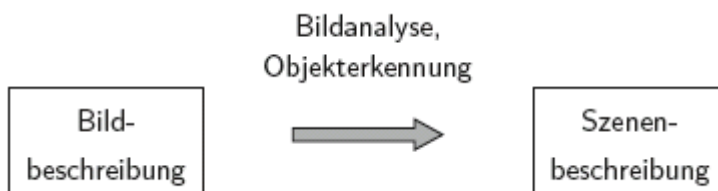


Abbildung 9. Überführung der Bildbeschreibung in eine Szenenbeschreibung mittels Bildanalyse und Objekterkennung (Steinmüller, 2008).

Um die Bildbeschreibung in eine Szenenbeschreibung zu überführen, müssen die einzelnen Bildelemente interpretiert und in Zusammenhang mit einer Szene gebracht werden. Das bedeutet beispielsweise, dass zunächst eine Kante innerhalb des Bildes detektiert wird, im nächsten Schritt diese Kante dann in Zusammenhang mit den umliegenden Elementen betrachtet wird. Am Beispiel der inneren Asphaltstruktur kann ein helles Element neben der Kante ein Element des Gesteinskorns darstellen, ein dunkleres Element die Grenze zur Asphaltmörtelphase. Über die Objekterkennung (Kante als Grenze zwischen Gesteinskorn Asphaltmörtelphase) und die Einordnung in den Zusammenhang mit den umliegenden Objekten (Gesteinskorn, Asphaltmörtelphase), lässt sich die Szene des Bildes (Bild eines Gesteinskörnungsgewebes in einer Asphaltmörtelphase) beschreiben (Steinmüller, 2008).

Voraussetzung zur automatischen Objekterkennung in einem Bild ist es, Merkmale der Objekte beziehungsweise Segmente zu extrahieren. Anhand der Merkmale erfolgt die charakteristische Beschreibung der Objekte, wodurch erst die eigentliche Objekterkennung ermöglicht wird. Im Rahmen der digitalen Bildanalyse sind es vor allem geometrische Merkmale wie

- Fläche (Anzahl der Bildpunkte),
- Umfang,
- Rundheit,
- Schwerpunkt und
- Textur.

der einzelnen Objekte beziehungsweise Segmente des Bildes, die mittels mathematischer Verfahren extrahiert werden. Diese mathematischen Verfahren sind im Detail beispielsweise bei Steinmüller (2008) oder Erhardt (2008) dokumentiert und werden an dieser Stelle nicht weiter behandelt. Es werden lediglich die grundlegenden Verfahren dargelegt, die es ermöglichen, bestimmte Objekte innerhalb eines Bildes zu erkennen und dessen Merkmale zu extrahieren.

Die Verfahren zur Bestimmung von Objektmerkmalen innerhalb eines Bildes werden als morphologische Operationen bezeichnet, von denen ausgewählte im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden.

2.1.3.1 Morphologische Operationen

Morphologische Operationen verändern die Form von Objekten in einem Bild, indem die unmittelbare Nachbarschaft eines Bildpunktes mit in die Operation einbezogen wird. Die Größe und Form der einbezogenen Nachbarschaft kann dabei frei definiert werden (Erhardt, 2008).

Ein entscheidender Eingangsparameter bei morphologischen Operationen ist das strukturierende Element. Dieses wird durch den Bildpunkt und die einbezogene Nachbarschaft definiert und kann je nach Anwendungszweck in seiner Größe und Form variieren (Abbildung 10).

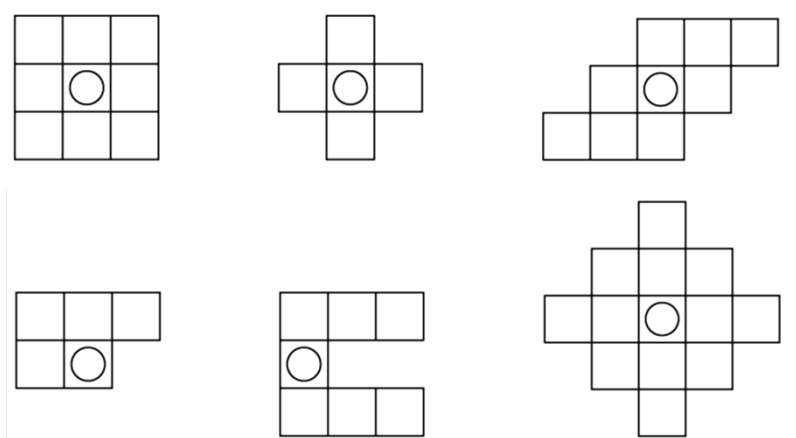


Abbildung 10. Beispiele für strukturierende Elemente als Eingangsparameter von morphologischen Operationen zur Objekterkennung in einem Bild; der Kreis definiert das Zentrum des Elements, indem der Bildpixel bei der Operation betrachtet wird (in Anlehnung an Erhardt, 2008).

Bei der Anwendung von morphologischen Operationen wandert das strukturierende Element über das Bild und jeder Bildpixel, der innerhalb des strukturierenden Elements liegt, wird der morphologischen Operation unterzogen.

Zu den wichtigsten morphologischen Operationen gehören (Jähne, 2012):

- Medianfilterung,
- Erosion (Schrumpfung),
- Dilatation (Ausdehnung) und
- Kombination aus Dilatation und Erosion (Opening und Closing).

(a) Medianfilterung

Bei der Medianfilterung werden die Grauwerte von benachbarten Pixeln zunächst in eine numerische Reihenfolge gebracht. Im Anschluss wird der Grauwert des jeweils betrachteten Pixels durch den Median der Pixelwerte der umgebenden Pixel ersetzt (vgl. Abbildung 11, links).

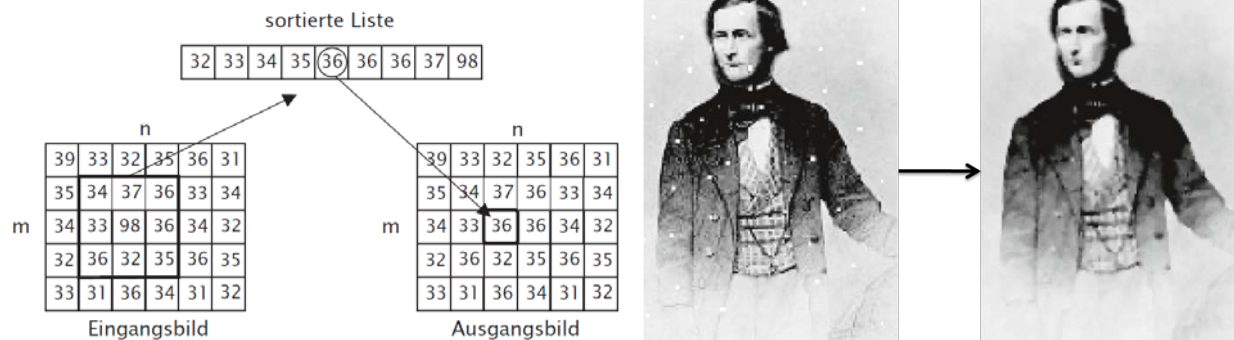


Abbildung 11. Prinzip der Medianfilterung (links, Jähne, 2012) und Beispiel für die Beseitigung von Pixelfehlern durch die Anwendung des Medianfilters, rechts.

Mit Hilfe des Medianfilters werden die Ausreißer beziehungsweise Extremwerte unterdrückt, welche durch das „Salz & Pfeffer-Rauschen“ oder durch Pixelfehler ausgelöst werden können. Die Medianfilterung eignet sich insbesondere zur Beseitigung von impulsförmigen Bildstörungen (Abbildung 11, rechts).

Medianfilter können mehrfach hintereinander geschaltet werden, da die Bildelemente, die beim ersten Durchlauf nicht verändert wurden, auch in weiteren Durchläufen unverändert bleiben. Das hat beispielsweise zur Folge, dass Kanten von Objekten erhalten bleiben. Nachteil von Medianfiltern ist die relativ hohe Rechenzeit, die für den Sortiervorgang in Anspruch genommen wird (Erhardt, 2008).

(b) Erosion und Dilatation

Durch die Modifikation des Medianfilters stehen die morphologischen Operationen Erosion und Dilatation zur Verfügung. Diese ermöglichen es, zusammenhängende Bereiche mit ähnlichen Grauwerten entweder auszudehnen (Dilatation), oder diese zu schrumpfen (Erosion), vgl. Abbildung 12.

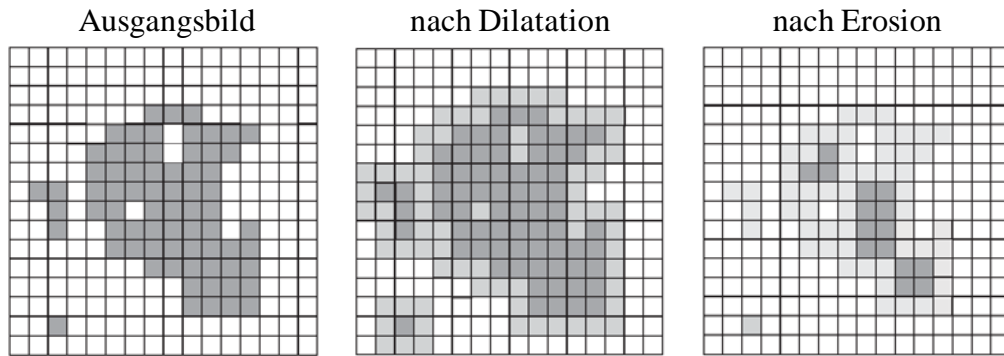


Abbildung 12. Anwendung von morphologischen Operationen zur Objekterkennung in einem Bild; Heller dargestellt sind die hinzugefügten Bildpunkte eines Objekts durch die Dilatation (Mitte), sowie die entfernten Bildpunkte eines Objekts durch die Erosion (rechts), in Anlehnung an Jähne, 2012.

Bei der Dilatation wird dem betrachteten Pixel nicht der Median der Pixelwerte der benachbarten Pixel, sondern der letzte Wert in der Rangfolge und damit der höchste Grauwert zugeordnet (Erhardt, 2008). Hierdurch wird das Objekt ausgedehnt, kleine Löcher oder Sprünge werden gefüllt, und die Konturen werden glatter.

Bei der Erosion wird dem betrachteten Pixel der erste Wert in der Rangfolge und damit der niedrigste Grauwert zugeordnet. Hierdurch werden Randpixel von Objekten entfernt, sodass die Objekte schrumpfen und Löcher innerhalb von Objekten vergrößert werden.

Je nach Form und Größe des strukturierenden Elements (vgl. Abbildung 12) wirkt dieses wie ein Netz mit Löchern, die der Form des strukturierenden Elements entsprechen. Alle Objekte, die durch die Löcher passen, "rutschen hindurch" und verschwinden aus dem Bild.

(c) Kombination aus Dilatation und Erosion

Werden Dilatations- und Erosionsoperator in Kombination verwendet, können Objekte innerhalb eines Bildes gezielt erkannt und extrahiert werden. Dabei wird zwischen zwei Kombinationen unterschieden (Erhardt, 2008):

- Erosion erfolgt vor Dilatation (Opening),
- Dilatation erfolgt vor Erosion (Closing).

Opening dient vor allem dazu, Ränder von Objekten zu glätten und fehlerhafte Verbindungen zwischen den Objekten (Brücken) zu entfernen. Besonders eignet sich Opening zur gezielten Extraktion von Objekten aus einem Bild. Das Vorgehen und das Ergebnis des Openings ist beispielhaft in Abbildung 13 dargestellt.

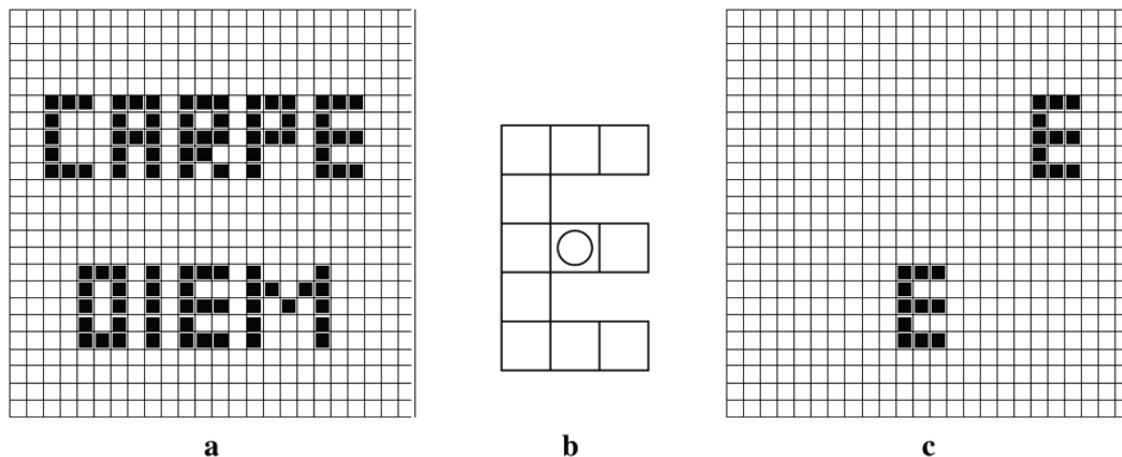


Abbildung 13. Anwendung von morphologischen Operatoren zur Extraktion von Objekten aus einem Bild; das Ausgangsbild (a) wird mittels des strukturierenden Elements (b) abgetastet und Bildbereiche, die nicht in dieses Element passen, werden eliminiert (c), in Anlehnung an Erhardt, 2008.

Die Extraktion des Buchstabens E erfolgt mittels eines strukturierenden Elements, welches die exakte Form des Buchstabens E besitzt. Das Bild wird pixelweise mit dem strukturierenden Element abgetastet. Alle Bildpixel, die nicht in die Form des strukturierenden Elements passen, werden eliminiert, sodass der Buchstabe E einwandfrei im Ausgangsbild detektiert und im Ergebnis fehlerfrei extrahiert dargestellt wird (Abbildung 13, rechts).

Mittel Closing werden vor allem Objekte wieder zusammengesetzt, die bei vorangegangenen Schritten in der Bildverarbeitung ungewollt auseinander gerissen wurden. Ohne die Objekte in ihrer Form zu verändern, können kleinere Löcher innerhalb des Objekts geschlossen werden (Erhardt, 2008).

2.1.3.2 Klassifikation von Objekten

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, ist es mit entsprechenden bildanalytischen Verfahren möglich, bestimmte Objekte in einem Bild aufgrund ihrer Merkmale zu identifizieren. Dies bildet die Grundlage, den erkannten Objekten im letzten Schritt eine Bedeutung zuzuordnen. Bedeutungen können dabei einfache Geometrien sein, wie beispielsweise ein Kreis oder aber weitaus komplexer definiert werden, wenn eine Bedeutung als ein reales Objekt definiert wird. Dann werden beispielsweise Kreise als Bälle gedeutet. Die Zuweisung von Bedeutungen zu Objekten in einem Bild wird als Klassifikation bezeichnet (Steinmüller, 2008 und Abbildung 14)

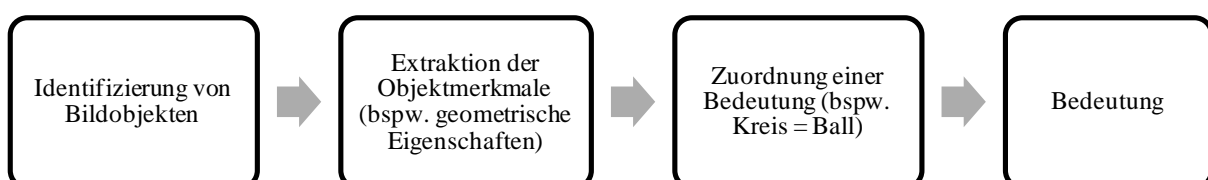


Abbildung 14. Prinzip der Klassifikation von Objekten im Rahmen der Bildanalyse, in Anlehnung an Steinmüller, 2008.

Ein maßgebender Schritt bei der Klassifikation von Bildobjekten kommt der Definition der Merkmale zu, die zu einer Klasse (Bedeutung) gehören (Erhardt, 2008). So ist es beispiels-

weise äußerst schwierig, die für ein Gesteinskorn im Asphalt repräsentativen geometrischen Eigenschaften exakt festzulegen, da diese naturgemäß sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Es besteht das Problem, die für ein Gesteinskorn repräsentativen Eigenschaften auszuwählen. Werden zu viele unterschiedliche Ausprägungen der geometrischen Eigenschaften als repräsentativ für ein Gesteinskorn definiert, wird die Klassifikation viele Bildobjekte fälschlicherweise als Gesteinskorn interpretieren. Im umgekehrten Fall führt eine zu strikte Festlegung der geometrischen Eigenschaften dazu, dass tendenziell zu wenige Bildobjekte als Gesteinskorn gedeutet werden.

Wenn die Festlegung der für eine Klasse repräsentativen Eigenschaften nicht vorab erfolgen kann, können Klassifizierungsverfahren verwendet werden, bei denen vor der eigentlichen Klassifizierung eine sogenannte Lernphase vorgeschaltet ist. Bei diesen Klassifizierungsverfahren werden zunächst die Klassenzentren (Anzahl und Position) im Datenraum des Bildes rechnerisch festgelegt und dann die Bildpixel iterativ zu Klassen zusammengefasst. Bei jeder Wiederholung wird der Mittelwert aus den Farb- / Grauwerten der Pixel einer Klasse neu berechnet, übrigbleibende Pixel zur ihnen ähnlichsten Klasse hinzugefügt und gegebenenfalls bereits klassifizierte Pixel einer anderen, näherliegenden Klasse zugeordnet. Die Zuordnung der einzelnen Bildpunkte zu einer Klasse erfolgt anhand des nächstgelegenen Klassenmittels. Die Pixel werden derjenigen Klasse hinzugefügt, bei dem sich die minimale Distanz zwischen dem Farb- / Grauwert des Pixels und dem Mittelwert der Farb- / Grauwerte aller einer Klasse zugehörigen Pixel ergibt. Das Zuordnen der Pixel zu Klassen wird solange durchgeführt, bis sich die Anzahl der in einer Klasse befindlichen Pixel weniger ändert als ein vorab definierter Prozentgrenzwert oder aber die ebenfalls vorgegebene maximale Zahl an Iterationen erreicht ist (Research Systems Inc., 2004).

Für eine bildanalytische Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur erscheint eine Klassifikation der Objekte nicht zwingend notwendig, da Anordnung, Orientierung und Verzahnung der Gesteinskörner sowie die Verteilung der Hohlräume für das Materialverhalten von Relevanz sind. Insofern bringt eine Klassifikation der geometrischen Formen innerhalb der inneren Asphaltstruktur als Gesteinskorn keine zusätzliche Erkenntnis hinsichtlich der lastabtragenden Eigenschaften.

2.2 Anwendung auf Asphalt

Auf Basis der vorgestellten grundlegenden Methoden zur Bilderfassung und Bildanalyse wurde die Entwicklung der Anwendung von bildanalytischen Methoden zur Strukturcharakterisierung von Asphalt in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten entscheidend vorangetrieben. Einen Überblick dazu gibt Abschnitt 2.2.1. Ausgehend von der bildanalytischen Untersuchung von Gesteinskörnungen entwickelten sich Ansätze, die innere Asphaltstruktur insgesamt zu charakterisieren (Abschnitt 2.2.2). Hierbei stehen insbesondere die Digitalbildaufnahme (2 dimensionale Bildgewinnung) und die Tomographie (3 dimensionale Bildgewinnung) im Fokus, da vornehmlich diese Methoden im Rahmen der Strukturanalyse von Asphalt Anwendung finden.

2.2.1 Charakterisierung der Gesteinskörnung

Es steht außer Frage, dass die geometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung, insbesondere bezüglich der Korngrößenverteilung, der Kornform, der Kornorientierung und der Oberflächentextur einen wesentlichen Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften des Asphalts haben. Die gegenwärtig im Technischen Regelwerk verankerten Methoden zur Bestimmung von geometrischen Kenngrößen der Gesteinskörnung liefern keine vollständige Charakterisierung. So wird beispielsweise die Oberflächenbeschaffenheit gem. Europäischer Normung bisher nur durch eine visuelle Abschätzung der Masseanteile an vollständig gebrochenen, gebrochenen oder vollständig runden Körnern charakterisiert (DIN, 2005). Ebenso aus technischer Sicht unzureichend werden Kornform und Plattigkeit prüftechnisch angesprochen. Es ergeben sich von der Subjektivität des jeweiligen Prüfers beeinflusste Ergebnisse. Weiterhin ist es praktisch unmöglich, geometrische Unregelmäßigkeiten einer Gesteinskörnung durch eine einzelne Testmethode anzusprechen, da die unterschiedlichen Parameter wie Kornform, Kornausrichtung oder Oberflächentextur teilweise völlig unabhängig voneinander sind, sie jedoch in ihrer Gesamtheit die geometrische Unregelmäßigkeit der Gesteinskörnung definieren.

Zusammenstellungen der international gebräuchlichen, konventionellen Prüfmethoden zur Bestimmung geometrischer Gesteinseigenschaften finden sich unter anderem bei Mather (1966), Janoo (1998), sowie Masad et al. (2005). Vor diesem Hintergrund sind diverse Forschungsarbeiten der Entwicklung und Anwendung von bildanalysebasierten Methoden zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen gewidmet. Literatursynthesen hierzu von Masad et al. (2005), Fernlund (2005), Lee et al. (2007), sowie Kumara et al. (2012) zeigen die Vielfalt an entsprechenden Ansätzen auf. Hierbei zeigt sich, dass vorrangig Methoden Verwendung finden, die die Bildanalyse von 2 dimensional erfassen Digitalaufnahmen zum Gegenstand haben. Daneben existieren Ansätze, die eine 3 dimensionale Bilderfassung beispielsweise mittels Stereokamerasystem oder das Abtasten der Gesteinskörner mittels Laserscanning verwenden. Im Folgenden werden in chronologischer Reihenfolge die Ergebnisse einer repräsentativen Auswahl an Studien zur 2 dimensional und 3 dimensional basierten Bilderfassung und -analyse der geometrischen Gesteinseigenschaften erläutert.

Kuo et al. (1998) entwickelten eine automatisierte Bildanalyse („Princeton gamma-tech“) zur Analyse der Gesteinsformen nach den Vorgaben der „American Society for Testing and Materials“ (ASTM). Die wesentlichen Parameter zur Charakterisierung der Gesteinsform waren der Feret-Durchmesser, der Formfaktor, die Sphärizität und die Rauheit. Auf Basis der Ergebnisse der Studie wurde die Entwicklung eines neuartigen Gesteinskörnungsklassifizierungssystems empfohlen. Brzezicki und Kasperkiewicz (1999) verbesserten dieses Konzept hinsichtlich der Messung von Schatten bei lotrechten Projektionen.

Persson (1998) setzte zur Entwicklung einer Methode für die Charakterisierung der feinen Gesteinskörnung eine digitale Kamera (3000 mal 2400 Pixel, 36 Bit Farbtiefe) zur Bilderfassung ein. Es wurden sowohl natürliche als auch gebrochene Gesteinskörnungen untersucht. Die Bildanalyse der Füllerfraktion (Gesteinskörnung < 0,063 mm) sowie der "gröberen" Gesteinsfraktionen (> 0,063 mm) erfolgte mittels unterschiedlicher Softwarealgorithmen. Nach

der Bilderfassung erfolgte die Analyse durch die Normalisierung der Graustufen, sowie anschließender Segmentierung. Das segmentierte Bild wurde in ein binäres Bild konvertiert. Im letzten Schritt der Bildanalyse erfolgte die Kantenerkennung mittels Sobel-Filter. Die erhaltenen Daten wurden mit Excel und SPSS, einem Statistikprogramm, weiterverarbeitet. Als Ergebnis wurde ein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen Kornform und Korngrößenverteilung nachgewiesen. Desweiteren konnten die jeweiligen Gesteinspartikel anhand ausgewählter Parameter bezüglich ihrer geometrischen Eigenschaften charakterisiert werden. Eine unsorgfältige Probenvorbereitung erwies sich zudem als Hauptfehlerquelle für das Analyseergebnis.

Masad und Button (2000) entwickelten einen einheitlichen Ansatz zur Messung der Kantigkeit von Gesteinskörnungen, sowie deren Textur mittels Bildanalyse. Die Bestimmung der Kantigkeit der Gesteinskörnung erfolgte an Bildern mit niedriger Auflösung, die Bestimmung der Textur wurde mit hoher Auflösung realisiert. Die Bilderfassung erfolgte mittels einem optischen Mikroskop, an dem eine digitale Kamera befestigt war. Dabei wurden Bilder mit einer Auflösung von 512 mal 512 Pixeln und 256 Graustufen aufgenommen. Nach der digitalen Bildanalyse (Anwendung von Filtern zur Glättung und Kantendetektion) wurden die Ergebnisse der Bildanalyse jenen aus der visuellen Inspektion gegenübergestellt. Es konnte die Eignung der Bildanalyse zur Bestimmung geometrischer Parameter von Gesteinskörnungen nachgewiesen werden. Vorteile liegen in der höheren Produktivität bei gleichzeitiger Minimierung der Anfälligkeit in Bezug auf menschliche Fehler.

Eine auf 3 dimensionaler Bilderfassung basierende Methode zur Erfassung der Sphärizität und weiterer Eigenschaften von groben Gesteinskörnungen entwickelten Mora und Kwan (2000). Dazu verwendeten sie mehrere Videokameras zur Bilderfassung. Die Gesteinspartikel wurden auf einem Probenteller aufgenommen, der sich unterhalb der Kamera befand. Mittels der Bildanalyse wurden sie vom Hintergrund unterschieden, sowie der Kontrast zwischen den Gesteinspartikeln und dem Hintergrund erhöht, um die einzelnen Grenzen der Gesteinspartikel zu erkennen. Mittels „digital image processing“ (DIP) wurden erfolgreich folgende Parameter der Gesteinspartikel gemessen: Ausdehnungsverhältnis, Sphärizität, Formfaktor und Konvexität.

Wichtige Beiträge zur Entwicklung eines automatisierten Systems zur bildanalytischen Bestimmung von geometrischen Gesteinseigenschaften lieferten Fletcher (2002) und Masad (2003) mit der Einführung des "automated aggregate imaging systems" (AIMS) zur Bestimmung von Kornform, Kantigkeit und Oberflächentextur von Gesteinskörnungen unterschiedlicher Größe. Sowohl feine, wie grobe Gesteinskörnungen können mittels AIMS analysiert werden. Weiterentwicklungen des Systems wurden durch Chandan et al. (2004) erarbeitet, in denen durch die Einführung neuer Algorithmen in der Bildanalyse höhere Genauigkeiten erreicht werden, sodass weitere geometrische Parameter wie Formfaktor oder Sphärizität rechnerisch ermittelt werden können.

Maerz (2004) wandte bei der Bestimmung von Gesteinsformen eine 3 dimensionale Bilderfassung an. Hierbei wurden zwei dual synchronisierte, fortschreitende Doppel-Geschwindigkeitskameras zur Aufnahme der Gesteinspartikel verwendet (vgl. Abbildung 15).

Die Gesteinspartikel rotieren während der Aufnahme auf einem durchsichtigen Probenteller. Beide Kameras sind mit einem Framegrabber verbunden, einer elektronischen Schaltung zur Digitalisierung analoger Videosignale. Dadurch werden die Bilder simultan digitalisiert. Zur Bildanalyse werden diese synchronisierten Bilder an einen Computer übertragen. Durch einen C++ basierten Algorithmus konnten im Rahmen der Bildanalyse die Grenzen der einzelnen Gesteinspartikeln identifiziert werden.

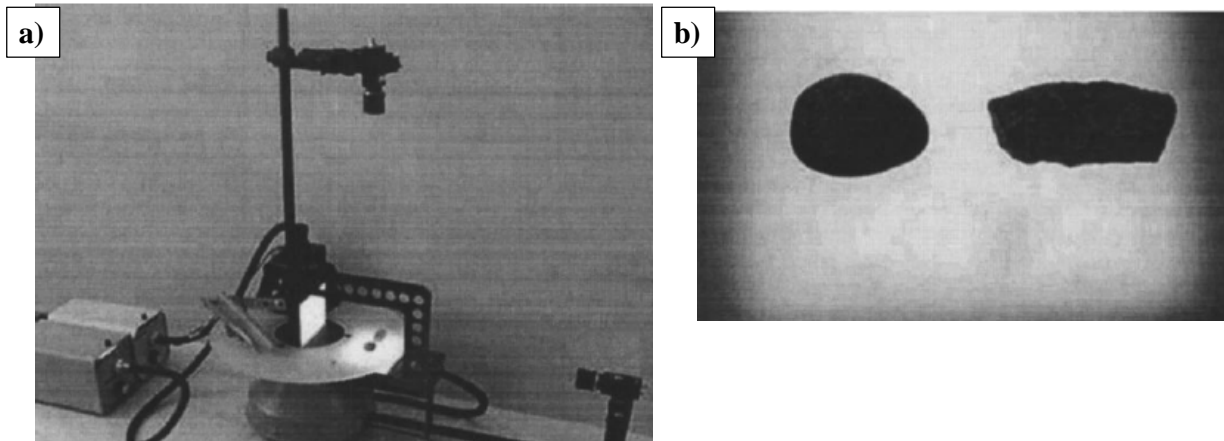


Abbildung 15. Messstand zur Bestimmung der Form von Gesteinspartikeln (a), sowie aufzunehmende Gesteinspartikel auf durchsichtigem Probenteller (b), (in Anlehnung an Maerz, 2004).

Die bildanalytische Bestimmung der Gesteinsform lieferte zuverlässige Testergebnisse bei einer schnellen und kostengünstigen Bestimmung. Desweiteren wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Bildanalyse und konventionellen (visuellen) Tests festgestellt.

Fernlund (2005) untersuchte die geometrischen Gesteinseigenschaften mittels einer 3 dimensional Bilderfassung unter Verwendung einer Digitalkamera. Die einzelnen Gesteinskörner wurden nach einer ersten 2 dimensional Bilderfassung manuell gedreht und anschließend eine zweite 2 dimensionale Aufnahme realisiert. Hierdurch wurde quasi die 3 dimensionale Bilderfassung der geometrischen Kenngrößen ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die zweimalige 2 dimensionale Erfassung vergleichbare geometrische Kenngrößen bestimmt werden im Vergleich zur herkömmlichen, manuellen Abmessung der Gesteinskörner. Jedoch wurde der hohe Zeitaufwand bei der Umlagerung der einzelnen Gesteinskörnung im Rahmen der zweimaligen Bilderfassung als Nachteil bewertet.

Weiterhin existieren Untersuchungen, in denen die Bilderfassung mittels Laserabtastung realisiert wurde. So zeigen beispielhaft Lee et al. (2007), das durch Laserabtastung die geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen 3 dimensional realitätsnah erfasst werden können. Diese Methode vereint Vorteile bezüglich einer im Vergleich zu optischen 3 dimensional Kamerasystemen einfacheren Prüfapparatur und der Möglichkeit, die geometrischen Gesteinseigenschaften zeitnah durch Scannen der auf einem Fließband durchlaufenden Gesteinskörnungen zu bestimmen.

In neueren Untersuchungen zur bildanalytischen Bestimmung der Korngrößenverteilung (KGV) von groben Gesteinskörnungen wurden Probleme bei der Vergleichbarkeit der Ergeb-

nisse mit den konventionell mittels Siebung ermittelten KGV aufgezeigt (Kumara, 2012). Bei der bildanalytischen Methode wird die KGV über entsprechende Flächenanteile der einzelnen Gesteinskörnungen bestimmt, während dies mittels Siebung über die gravimetrischen Anteile erfolgt. Diese grundsätzliche Problematik ließe sich nur zufriedenstellend lösen, indem eine 3 dimensionale Bilderfassung angewandt und hierdurch eine Abschätzung der gravimetrischen Anteile aus der Bildanalyse ermöglicht würde. Weitere Fehlerquellen wurden in der unterschiedlichen Anzahl an Gesteinskörnungen zwischen Sieb- und Bildanalyse, sowie in schattenbedingten Fehlinterpretationen bei der Bildanalyse identifiziert.

2.2.2 Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur

Wie im vorangegangenen Kapitel 2.2.1 dargelegt, wurden über die letzten 20 Jahre diverse auf Bildanalyse basierende Ansätze zur Charakterisierung der geometrischen Gesteinseigenschaften entwickelt und ihre Praxistauglichkeit nachgewiesen. Die Möglichkeit, die Eigenschaften einzelner Gesteinskörner zu untersuchen, ist im Rahmen einer Qualitäts- beziehungsweise Wareneingangskontrolle für diesen Baustoff sinnvoll und richtig. Weiterhin ermöglicht es die umfassendere geometrische Charakterisierung, also nicht nur Kornform und Plattigkeit, sondern gleichzeitig auch die Beurteilung der Oberflächentextur, ein besseres Verständnis des Baustoffs und dessen Wirkung im eingesetzten Baustoffgemisch (ungebunden, Beton oder Asphalt). Naheliegend ist nun jedoch der Schritt, die geometrischen Eigenschaften des Baustoffgemischs direkt – also letztlich die aus der Vermischung und Verdichtung des Baustoffgemischs resultierende Struktur – zu analysieren und zu beurteilen.

Bezüglich der Kraftabtragung in einem Baustoffgemisch und damit auch in Bezug auf den inneren Zusammenhalt von Asphalt ist das Konzept von „Kraftketten“ von Bedeutung. Die Theorie der Kraftketten für granulare Materie, wie beispielsweise körniges Material in Form von Sand oder Gesteinskörnungsgemische, ist allgemein anerkannt und seit über 50 Jahren ausgiebig dokumentiert (Horne, 1965; Edwards et al. 1989, Cates et al., 1998; Sun et al., 2010, 2013). Die Theorie besagt, dass nur zusammenhängende Partikel (z. B. Gesteinskörner) bei der Kraftübertragung primär von Interesse sind, Gesteinskörnungen ohne jeglichen Kontaktpunkt zu benachbarten Körnern sind hinsichtlich der Kraftabtragung vernachlässigbar, da sie nicht zur Tragstruktur und damit zur Lastübertragung beitragen (Abbildung 16).

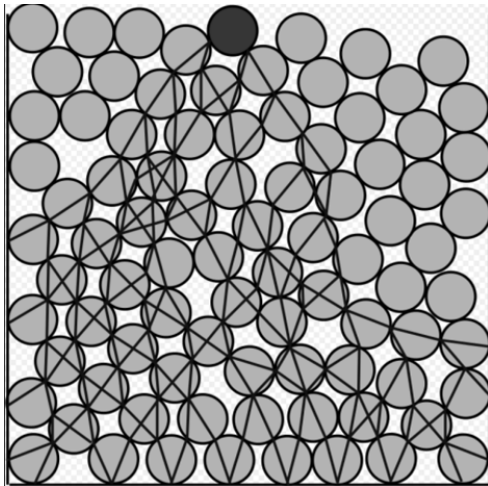


Abbildung 16. Theorie der Kraftketten bei der Lastabtragung in granularer Materie (o. A., 2016).

Der Einfluss der inneren Struktur auf Basis der Kraftketten, charakterisiert durch Kontaktpunkte /-längen auf die Spannungs-Dehnungsverteilung im Asphaltkontinuum wurde bereits unter anderen von Zhu et al. (2000) nachgewiesen.

Da in dieser Arbeit die bildanalytische Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur im Fokus steht, werden im Folgenden die maßgebenden Entwicklungsschritte hierzu dargelegt. Hierbei finden vorrangig Methoden Anwendung, die auf Basis der 2 dimensional-Digitalbilderfassung operieren (vgl. Abschnitt (a), zerstörende Methode). Weitergehende Methoden, die die innere Asphaltstruktur 3 dimensional und zerstörungsfrei erfassen und charakterisieren, konzentrieren sich auf den Einsatz der Computertomografie (CT) und werden im Abschnitt (b) aufgeführt.

(a) Digitalbildanalyse (zerstörende Methode)

Yue et al. (1995) zeigten Möglichkeiten zur Bestimmung der Gesteinsorientierung in Asphaltgemischen auf Basis eines innovativen Verfahrens zur Digitalbildverarbeitung des „National Research Council of Canada“ (NRC) auf. Der Schwachpunkt vorangegangener Studien wurde im Bereich des Verbundmaterials vermutet, welches meist als homogen und isotrop angenommen und dessen Heterogenität und Anisotropie ausgeklammert wurde. Im Rahmen des Mix-Design von Asphalt standen vorrangig bis dato lediglich makroskopische Eigenschaften der entstandenen Composite wie beispielsweise Festigkeit oder Viskosität im Fokus (Selvadurai et al., 1990). Etwaige Verfahren zur Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur mittels Bildverarbeitung fanden Anfang der 1990er Jahre daher noch keine Anwendung.

Daher widmeten sich Yue und Morin (1996) der quantitativen Ermittlung der 3 dimensional Orientierung von groben Gesteinspartikeln mit einer Größe von 2 mm in Asphaltbeton. Hierzu wurden die unterschiedlichen Gesteinsorientierungen horizontaler und vertikaler Querschnitte von zylindrischen Gyrator-Probekörpern und Marshall-Probekörpern aus Asphaltbeton (Abbildung 17) mittels Digitalbildanalyse untersucht und die Vorgehensweise bei der Analyse der 3 dimensional Gesteinsorientierung über 2 dimensionale Bilddaten beschrieben.

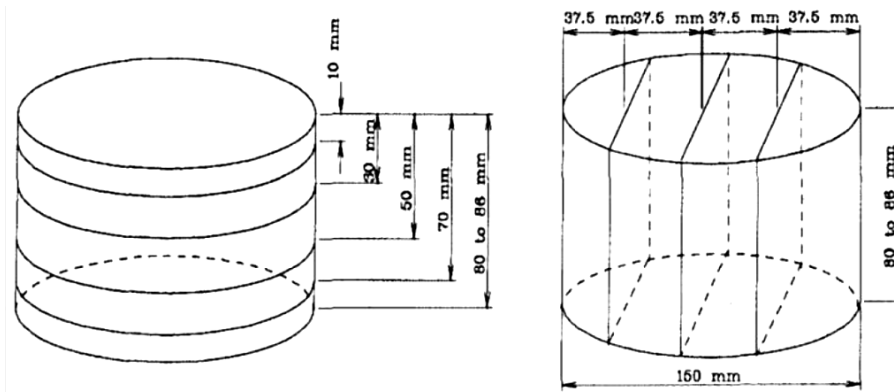


Abbildung 17. Querschnitte zur Untersuchung der 3-dimensionalen Orientierung von Gesteinspartikeln in Asphaltbeton (Yue et al., 1996).

Zunächst wurden Aufnahmen der Querschnitte (Seitenverhältnis von 3:2) mittels Flachbettscanner mit einer Auflösung von bis zu 300 dpi digitalisiert und in Graustufen abgespeichert. Anschließend wurden die Umrisse der Gesteinspartikel manuell skizziert, farblich ausgefüllt (Gesteinspartikel in weiß, übrige Bestandteile in schwarz), um die Differenzierung für die Bildverarbeitungssoftware zu vereinfachen, und mittels selbiger die morphologischen Kennwerte berechnet. Zu diesem Zeitpunkt stand kein automatisierter Algorithmus zur Umrissdetektion zur Verfügung. Die morphologischen Kennwerte umfassten Schwerpunkte, Flächen, Haupt- und Nebenachsen, Hauptachsenorientierungen, Feret-Durchmesser und Shape-Faktoren. Der Feret-Durchmesser (auch als äquivalenter Durchmesser beziehungsweise. ϕ EqD bezeichnet) beschreibt hierbei ein fiktives kreisrundes Korn mit der gleichen Fläche wie das betrachtete Korn. Der Shape-Faktor (Formfaktor) beschreibt, wie annähernd kreisrund sich die Form des Kornes darstellt (Abbildung 18).

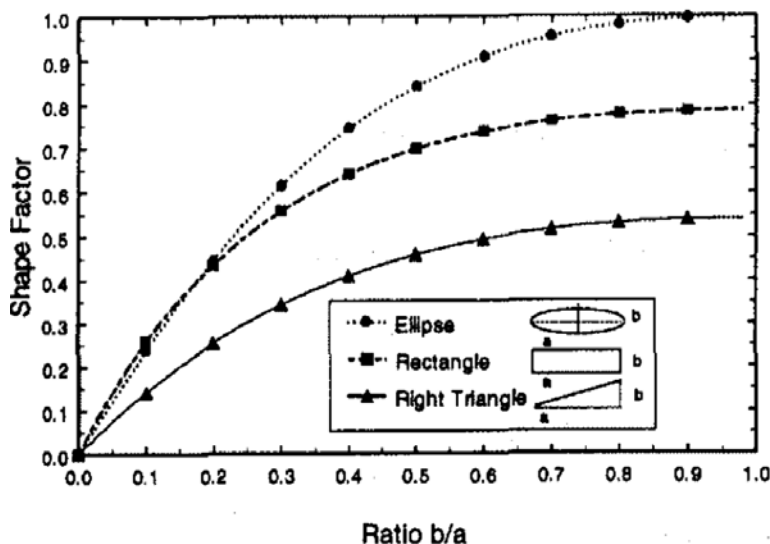


Abbildung 18. Bestimmung des Formfaktors für unterschiedliche Grundformen im Rahmen der Strukturcharakterisierung von Asphalt mittels Digitalbildanalyse (Yue et al., 1996)

Yue und Morin (1996) hielten als Ergebnis fest, dass in den betrachteten Querschnitten von Gyrator-Probekörpern tendenziell eine horizontale Gesteinsorientierung festzustellen war. In den Marshall-Probekörpern sind die Hauptachsen im Gegensatz dazu eher zufällig angeordnet, weshalb sie daher weniger gut zur Modellierung geeignet seien.

Kim et al. (2000) beschrieben ein auf Lasertechnik basierendes Scansystem (LASS) und Masad et al. (2001b) zeigten mithilfe einer CCD-Kamera Vergleichsaufnahmen von verformten sowie unverformten Gyrator-Probekörpern zur Bestimmung der Spannungsverteilung auf (Abbildung 19).

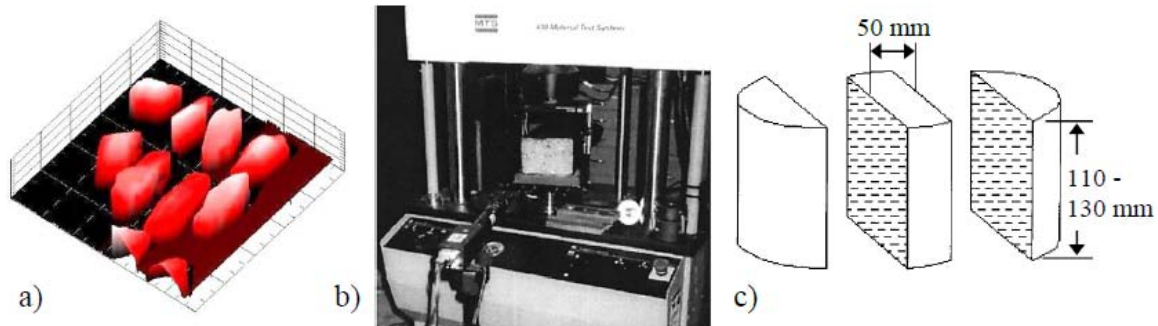


Abbildung 19. Aufnahme eines laserbasierten Scansystems zur 3-dimensionalen Erfassung der inneren Asphaltstruktur (a) und zugehöriger Versuchsaufbau (b) (Kim et al., 2000), Querschnitte der 2-dimensionalen Digitalbilderfassung der Vergleichsprobekörper (c) (Masad et al., 2001b).

Masad et al. (2001a) nutzten eine computerautomatisierte Bildanalyse, um Form, Winkligkeit und Textur von Feinanteilen zu quantifizieren, die Belichtung zu optimieren und einen Zusammenhang zum Verformungswiderstand herzustellen. 2001 veröffentlichte Masad eine Synthese bestehender Ansätze zur bildanalytischen Strukturcharakterisierung (Kornform, -orientierung, Textur) und zeigte damit die Grundlagen für die weiteren Entwicklungen auf.

Lakes et al. (2002) nutzen die 2 dimensionale Digitalbilderfassung mittels Scanner, um Eingangsgroßen für eine anschließende FE-Modellierung der inneren Asphaltstruktur zu gewinnen. Die Bildsegmentierung erfolgte anhand eines Schwellwertes über die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte (Histogramm) der erfassten Bilder (vgl. Kap. 2.1.2). Es stellte sich heraus, dass das Histogramm für gewöhnlich zwei Hochpunkte und inmitten einen Tiefpunkt aufweist. Eine automatisierte Ableitung des Schwellwerts aus dem Histogramm zur Bildsegmentierung in Gesteinskorngrenzen und Hintergrund ließ sich jedoch nicht erfolgreich umsetzen. Um eine akzeptable Genauigkeit der Strukturcharakterisierung mittels Bildsegmentierung zu erreichen, wurde ein manuelles Vorgehen bei der Schwellwertsuche empfohlen.

Hunter et al. (2004) untersuchten die Abhängigkeit der volumetrischen Eigenschaften eines Asphaltmischguts von der Verdichtungsart (Rotations-, Vibrations- und Schlagverdichtung) mittels 2 dimensionaler Digitalbilderfassung. Die Bilderfassung und -analyse erfolgten an 40 Aufnahmen je Probekörper. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Gesteinspartikel in Probekörpern nach Rotations-, Vibrations- sowie Schlagverdichtung zu einer horizontalen Lage tendieren und dass die Ergänzung der Schlag- durch die Vibrationsverdichtung einen Anstieg in der horizontalen Tendenz zur Folge hatte. Es wurde ein Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Kornorientierung und der durchschnittlichen Kornfläche bei rotationsverdichteten Probekörpern erkannt. Anzumerken ist jedoch, dass diese Ergebnisse nicht statistisch, beispielsweise durch Signifikanztests abgesichert wurden.

Tashman et al. (2005) entwickelten ein viskoplastisches Kontinuumsmodell für die Deformation von Asphaltbeton bei hohen Temperaturen, zunächst basierend auf mittels

2 dimensionaler Digitalbilderfassung gewonnenen Kennwerten der Mikrostruktur. Darauf aufbauend verwendeten Tashman et al. (2007) für ihr Kontinuumsmodell Eingangsgrößen, die durch 3 dimensionale CT-Bilderfassung bestimmt wurden. Als Strukturparameter wurden Gesteinsform, Gesteinsorientierung, Durchlässigkeit und Hohlraumverteilung ermittelt.

You und Dai (2007), You et al. (2008), Adhikari und You (2011) sowie Zhang und Yang (2013) nutzen ebenfalls die Bildanalyse zur Modellierung der inneren Asphaltstruktur mittels Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und Finite-Elemente-Methode (FEM).

Wang und Hao (2011) verwendeten die Bildanalyse, um die Veränderung der inneren Asphaltstruktur im indirekten Zugversuch mittels FEM zu modellieren. Bei der Bildsegmentierung wurden separate Schwellwerte sowohl zur Unterscheidung zwischen Gesteinskörnung und Mastix als auch zwischen Hohlräumen und Mastix festgelegt. Dies ermöglichte die exakte Detektion von Objektgrenzen der Gesteinskörnung und der Hohlräume.

Bahia et al. (2012) untersuchten Zusammenhänge zwischen der inneren Asphaltstruktur und dem Verformungswiderstand unter Verwendung von mit gemahlenem Reifengummi versetztem Bindemittel. Zu diesem Zweck wurden eingescannte Bilder von Asphaltproben mittels des "Image Processing and Analysis Systems" (iPas) analysiert und unter anderem Spurbildungstests durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Zugabe des gemahlenen Reifengummis zu einer Verbesserung des Verformungswiderstands des Asphalts führt, sich jedoch kein signifikanter Einfluss auf die innere Asphaltstruktur ergibt.

In den bis zum Jahr 2012 betrachteten Untersuchungen zur digitalbildanalytischen Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur wurden zwar die gleichen grundlegenden Operationen zur Bilderfassung und Bildanalyse verwendet, jedoch wurden die dazu notwendigen Algorithmen auf unterschiedlichen Programmierplattformen umgesetzt. Desweiteren mangelte es an der Genauigkeit der Bildanalyse, sofern nicht manuelle Korrekturen, beispielsweise durch eine iterative Festlegung des Schwellwerts bei der Bildsegmentierung, vorgenommen wurden. Durch die notwendigen, manuellen Korrekturen wurden die Analyseprozesse zeitaufwändig und das Analyseergebnis teilweise abhängig von der Subjektivität des Anwenders. Dies brachten vor allem Coenen et al. (2012) zum Ausdruck, die die Genauigkeit der Bildverarbeitung und -analyse zu diesem Zeitpunkt bemängelten. Die vorhandenen Bildanalyseverfahren hielten sie für nur bedingt geeignet und bemängelten die wenig nutzerfreundliche Bedienung.

Vor diesem Hintergrund wurde bereits 2011 von Coenen die Entwicklung des MATLAB basierten Image Processing and Analysis Systems (iPas) vorgestellt. Dieses System vereint eine automatisierte Bildverarbeitung mittels unterschiedlicher Filteranwendungen, sowie die anschließende Bildanalyse, in der die Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur anhand von Kontaktpunkten und Kontaktororientierung der Mikrostruktur ermöglicht wird. Desweiteren ermöglicht iPas durch eine entsprechende Benutzeroberfläche eine anwendungsfreundliche Bedienung.

Die Nachfolgeversion iPas² wurde vom „Asphalt Research Consortium“ (ARC) und vom „Modified Asphalt Research Center“ der Universität Wisconsin-Madison (UW-MARC) in Zusammenarbeit mit der Michigan State University entwickelt (Christensen et al., 2014). An der Entwicklung beteiligt waren zudem Bahia und Sefidmazgi von der University of Wisconsin-Madison.

sin-Madison sowie Kutay von der Michigan State University. Darüber hinaus leisteten Coenen, Velasquez, Tashman und Mahmud Beiträge. Folgende entscheidende Vorteile brachte die Weiterentwicklung iPas² gegenüber der Vorgängerversion:

- Neben der Charakterisierung der Mikrostruktur wird zusätzlich die Analyse des sogenannten Asphaltskeletts (definiert als innere Gesteinsstruktur, über die hauptsächlich die Lastabtragung über Kraftketten) ermöglicht.
- Es können zusätzliche Parameter zur Strukturcharakterisierung bestimmt werden, die sich auf die Effektivität der Gesteinskontakte beziehen; Beispiele hierfür sind die Summe der Kontaktlängen (total contact length) und durchschnittlicher Kontaktwinkel des Asphaltskeletts (average absolute angle for normal to contact plane orientation in the skeleton, AAA), sowie die Summe der Widerstandskomponenten in Lastrichtung (Internal Structure Index, ISI).

Die Softwareentwicklung von iPas² wird als ein Meilenstein bei der laborökonomischen Anwendung der Strukturcharakterisierung von Asphalt mittels 2 dimensionaler Digitalbildanalyse gesehen.

Bruno et al. (2012) zeigten die Möglichkeit auf, die Korngrößenverteilung eines Asphaltmischguts mit großer Genauigkeit bildanalytisch zu bestimmen und so auf die Trennung des Bitumens von der Gesteinskörnung durch Extraktion zu verzichten.

Untersuchungen zum Einfluss des Verdichtungsverfahrens auf die Gesteinsorientierung führten Hamzah et al. (2013) durch. Die Gesteinsorientierung der gescannten Querschnitte der Probekörper wurde mittels 2 dimensionaler Digitalbildanalyse bestimmt. Es wurden keine signifikanten Einflüsse des Verdichtungsverfahrens auf die Gesteinsorientierung festgestellt. Für Marshall-Probekörper, wie auch Gyrator-Probekörper tendierte die Orientierung der Gesteinskörner zur Horizontalen.

Dagegen stellten Bahia und Roohi (2013) systematische Einflüsse von Verdichtungsmethode, Temperatur und Druck auf die innere Asphaltstruktur fest. Die Strukturanalysen wurden mittels der Software iPas² durchgeführt. Dabei wurden sowohl Bohrkerne als auch Labor-Probekörper aufgenommen und analysiert. An den Bohrkernen wurden steigende Kontaktlängen bei steigender Belastung und bei höheren Temperaturen festgestellt. Die unterschiedlichen Verdichtungsmethoden führten an den Labor-Probekörpern zu signifikant unterschiedlichen Strukturparametern.

Daran anknüpfend identifizierten Roohi und Bahia (2014) in weiteren Untersuchungen Zusammenhänge zwischen der mittels iPas² ermittelten inneren Asphaltstruktur und ausgewählten Gebrauchseigenschaften. Es wurden weiterentwickelte Strukturparameter definiert und bestimmt – beispielsweise die Anzahl der Näherungszonen der Gesteinskörnung, die totale Näherungszonenlänge, der Durchmesser des Winkels zur Normalen – und der Einfluss auf die Neigung zur Spurrinnenbildung und den Widerstand gegenüber Kälterissbildung des Asphalts untersucht. Asphalte mit "dichter" innerer Struktur zeigten eine geringe Neigung zur Spurrinnenbildung. Weiterhin wirkte sich eine dichtere Struktur vorteilhaft auf den Widerstand ge-

genüber Kälterissbildung aus, da an diesen Varianten eine geringere Tendenz zum Aufbau kryogener Spannungen festgestellt wurde.

Eine Studie von Teymour und Bahia (2014) zeigte, dass Bitumenmodifikationen die Asphalteigenschaften grundsätzlich durch zwei Mechanismen beeinflussen: Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der kontinuierlichen Phase (Bitumen und Asphaltmörtelphase) und die Steuerung der inneren Asphaltstruktur (beispielsweise die Packdichte des Gesteinskörnungsgerüsts). Die relative Bedeutung dieser zwei Mechanismen wurde anhand des Widerstands gegenüber Kälterissbildung von Asphalt untersucht. Neben den experimentellen Arbeiten wurden Berechnungen mittels Finite-Element-Methode (FEM) durchgeführt. Die Untersuchungen wurden an drei Asphaltvarianten unter Variation der Polymermodifizierung (Elastomer, Plastomer und Mischung aus Elastomer und Plastomer) vorgenommen. Mittels Bending Beam Rheometrie wurde das Tieftemperaturverhalten der Bitumen- und Mastixvarianten angesprochen und die Ergebnisse als Eingangsgröße für das FE-Modell der inneren Asphaltstruktur verwendet. Weiterhin wurden Digitalbildanalysen an Schnitten der Asphalt-Probekörper zur Modellierung der inneren Asphaltstruktur vorgenommen. Die Untersuchungsergebnisse zeigten einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Parametern zur Beschreibung der inneren Asphaltstruktur und den Versuchsergebnissen zur Ansprache des Tieftemperaturverhaltens. Sowohl die Laborergebnisse, wie auch die FE-Modellierung bestätigten, dass durch die Bitumenmodifikation die innere Asphaltstruktur in der Art optimiert werden kann, dass eine günstigere Verteilung der thermisch bedingten Dehnungen erreicht wird.

Neueste Erkenntnisse zur Veränderung der inneren Asphaltstruktur während einer Druckbelastung lieferten Roohi und Bahia (2016). Zylindrische Asphalt-Probekörper wurden einem Druck-Schwellversuch unterzogen und die innere Asphaltstruktur vor Versuchsbeginn, nach einer definierten Anzahl an Belastungszyklen, sowie nach Versagen des Probekörpers am Versuchsende mittels der Bildanalysesoftware iPas² charakterisiert. Anhand der Veränderungen der inneren Asphaltstruktur durch die Belastung konnten folgende Ergebnisse formuliert werden:

- Die mittels Bildanalyse bestimmte innere Asphaltstruktur in Form der "Packungsdichte" stellt einen wesentlichen Einflussfaktor auf den Verformungswiderstand von Asphalt dar.
- Die Packungsdichte nimmt während der ersten Kriechbelastungsphase durch die Nachverdichtung zu.
- In der zweiten Belastungsphase nimmt die Packungsdichte durch erste Schädigungen des Asphaltskeletts kontinuierlich zu.
- In der tertiären Belastungsphase kann das Versagen des Probekörpers eindeutig auf den durch das Ausbauchen der Mantelfläche resultierenden gestörten Verlauf des Asphaltskeletts zurückgeführt werden.

(b) Computertomografie (zerstörungsfreie Methode)

Die grundlegende Funktionsweise der zerstörungsfreien 3 dimensionalen Bilderfassung mittels Computertomografie (CT) ist in Kap. 2.1.1(b) dargelegt.

Während CT zur Analyse der mineralogischen Komposition von Gesteinskörnungen schon vor über 40 Jahren Anwendung fand (Fabbi, 1972) finden sich entsprechende Studien zur Anwendung von CT zur Strukturanalyse von Asphalt erst seit den 1990er Jahren.

So führten Braz et al. (1999) CT Untersuchungen zur Strukturveränderung von Asphalt-Probekörpern während eines Ermüdungsversuchs durch. Eine Besonderheit der Studie bestand darin, dass die Bilderfassung während des laufenden Ermüdungsversuches erfolgte. Dadurch war es möglich, die Rissentstehung innerhalb der Asphaltprobe zu erfassen. Mittels der Bildanalyse konnten Risse detektiert werden, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen waren. Das verwendete CT-Messsystem eignete sich noch nicht zur Strukturanalyse, jedoch wurden wichtige Erkenntnisse bezüglich der Kalibrierung des CT-Systems und Ansätze zur Weiterführung von mikrostrukturellen CT-Versuchen gewonnen.

Masad et al. (1999, 2002a) verwendeten die CT, um die Hohlraumverteilung, die Gesteinsorientierung sowie die Korngrößenverteilung in unterschiedlich verdichteten Gyrator-Probekörpern zu untersuchen. Anhand einer computerautomatisierten Bildanalyse der CT-Scans wurde die Mikrostruktur der Probekörper in Form der Vektormagnitude (Gleichmäßigkeit der Gesteinsorientierung zwischen 0 und 100%) und Hauptachsenwinkel (Mittelwert der Ausrichtung der Gesteinskörner) charakterisiert. Es wurde nachgewiesen, dass sich der durchschnittliche Hauptachsenwinkel mit zunehmender Verdichtung bis zu einem Grenzwert verringert und anschließend tendenziell erhöht. Die Vektormagnitude hingegen stieg mit entsprechender Verdichtung bis zu einem gewissen Grad an, um nach Überschreiten dieses Grenzwertes zu einer zufälligeren Anordnung zu tendieren. Hauptachsenwinkel und Vektormagnituden verhielten sich folglich gegensätzlich.

Romero und Masad (2001) befassten sich mit dem Modell des „Representative Volume Element“ (RVE), also dem minimal kleinsten Volumenelement innerhalb des Asphaltkontinuums, das dessen charakteristische Materialeigenschaften repräsentiert. Die Eingangsgrößen für das Modell wurden unter Verwendung der CT und einer anschließenden Bildanalyse gewonnen und die Ergebnisse in Zusammenhang mit dem Verformungswiderstand von Asphaltbeton gebracht.

Tashman et al. (2005) entwickelten ein auf der Mikrostruktur basierendes, visko-plastisches Kontinuumsmodell für die Deformation von Asphaltbeton. Hierfür wurde die radiale Verformung von Asphaltproben in Triaxialversuchen mittels CT bestimmt. Die Bildanalyse der CT-Scans lieferte strukturelle Parameter wie Gesteinsorientierung, Gesteinsform, Durchlässigkeit und Hohlraumverteilung als Eingangsgrößen für das Kontinuumsmodells.

Zeilew et al. (2008) brachten die Entwicklung eines automatisierten „Digital Image Processing“ (DIP)-Algorithmus zur Bildverarbeitung von CT-Scans von Asphaltstrukturen voran. Der Algorithmus ermittelt zwei Graustufen-Schwellwerte, um einerseits die Hohlräume und andererseits das Gesteinsskelett zu segmentieren. Die Ergebnisse der weiterführenden Arbei-

ten zur Optimierung des Algorithmus (Abbildung 20) sind bei Zelelew und Papagiannakis (2011) dokumentiert.

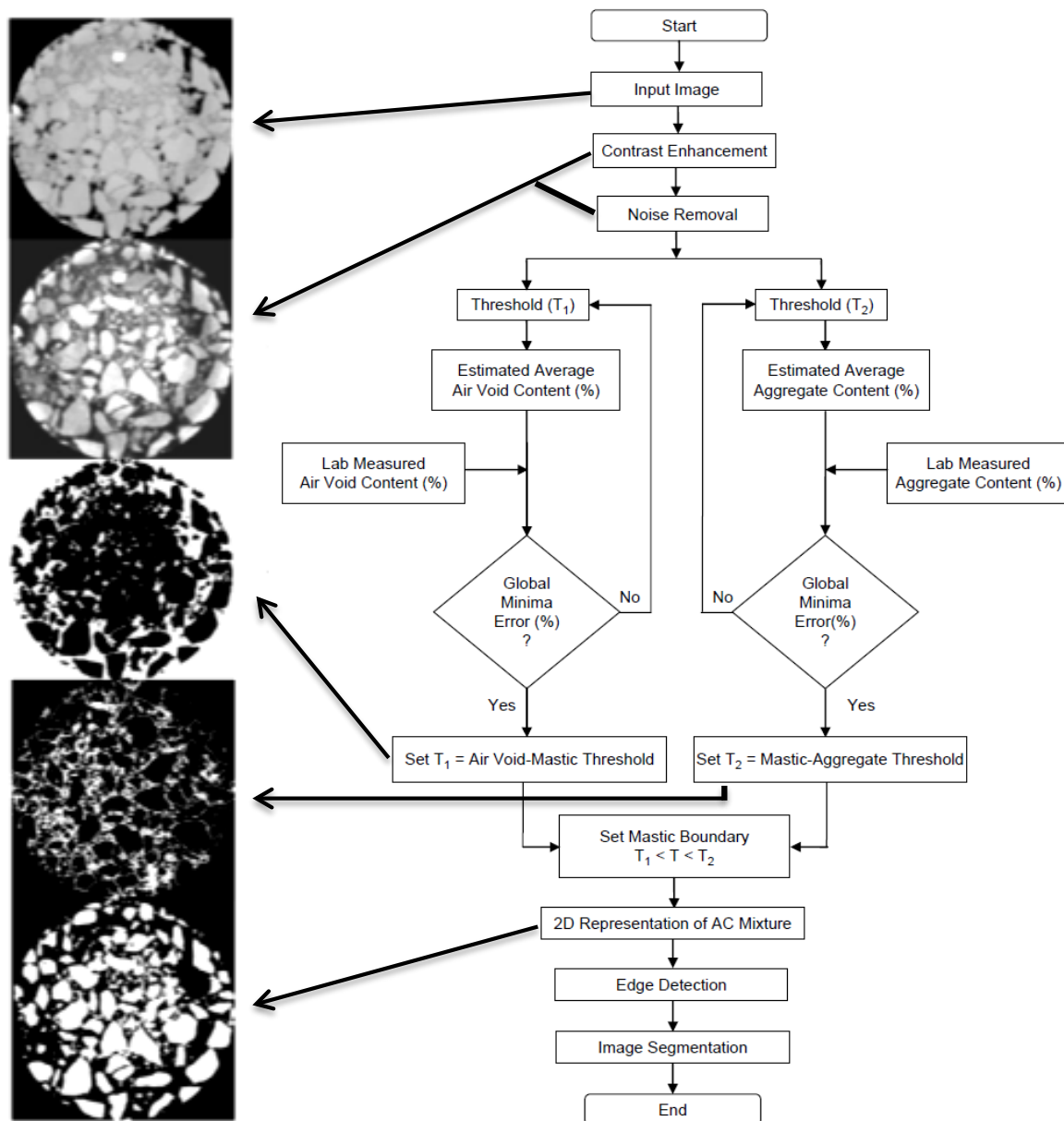


Abbildung 20. MATLAB basierter Algorithmus zur Strukturcharakterisierung von Asphalt mittels CT (Zelelew und Papagiannakis, 2011).

Den Einfluss der Verdichtung auf Hohlraumgehalt und -verteilung in Asphalt untersuchten Alvarez et al. (2010). Ziel war es, die Herstellung von Asphalt-Probeplatten hinsichtlich der Homogenität zu verbessern und Erkenntnisse über die horizontale und vertikale Verteilung, sowie die Größe der Hohlräume zu gewinnen. Die Struktur der Asphalt-Probeplatten wurde mittels CT und anschließender Bildanalyse charakterisiert. Es wurde festgestellt, dass sich eine heterogene Verteilung der Hohlräume über die Probenhöhe ergibt. In der Tendenz werden Ober- und Unterseite der Asphalt-Probeplatte weniger verdichtet (höherer Hohlraumgehalt) im Vergleich zur Plattenmitte (vgl. Abbildung 21).

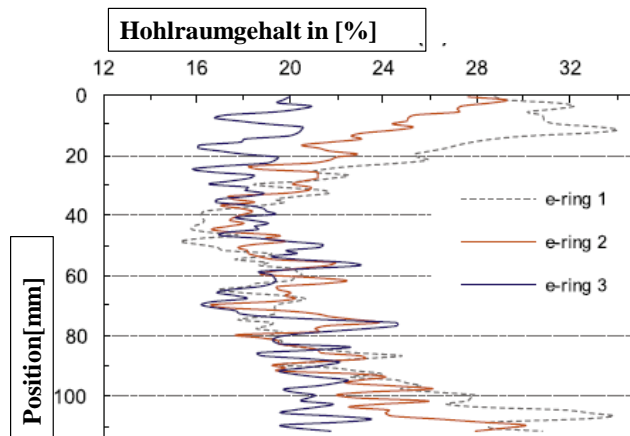


Abbildung 21. Verteilung des Hohlraumgehalts in einer im Labor hergestellten Asphalt-Probeplatte, bestimmt durch eine 3 dimensionale Strukturanalyse mittels CT (in Anlehnung an Alvarez et al., 2010).

Der Einfluss unterschiedlicher Verdichtungsmethoden auf die resultierende innere Asphaltstruktur wurde an Asphalt-Probekörpern und Bohrkernen aus Asphaltbefestigungen von Masad und Kutay (2012) untersucht. Die innere Asphaltstruktur wurde 3 dimensional mittels CT erfasst und primär die Kontaktpunkte zwischen den Gesteinskörnungen durch die Bildanalyse identifiziert. Bohrkernproben zeigten tendenziell eine höhere Anzahl an Kontaktpunkten im Vergleich zu den im Labor hergestellten Asphalt-Probekörpern. Hieraus leiteten sie einen systematischen Einfluss der Verdichtungsart auf die innere Asphaltstruktur ab.

Zhang und Yang (2013) nutzen CT-Scans, um Eingangsgrößen für die Modellierung der inneren Asphaltstruktur mittels der Diskreten-Elemente-Methode (DEM) und der Finiten-Elemente-Methode (FEM) zu gewinnen. Durch die Modelle war es möglich, den Einfluss variierender innerer Asphaltstrukturen auf das resultierende Materialverhalten zu prognostizieren.

Die Entwicklung der Hohlraumverteilung und Rissbildung von Asphalt-Probekörpern durch Kompression untersuchten Abdul Hasad et al. (2013). Dazu wurden die Asphalt-Probekörper dem „Uniaxial Monotonic Compression“ (UMC)-Test unterzogen und schichtenweise 2 dimensionale Bilder mittels CT vor und nach der Kompression erfasst. Der Deformationsprozess der Asphalt-Probekörper konnte visualisiert und die Hauptschadenszone zuverlässig identifiziert werden. Vergleichbare Ergebnisse erlangten Shaheen et al. (2015) durch ihre Untersuchungen an Probekörpern, die einem 4-Punkt-Biegeversuch ausgesetzt wurden.

2.3 Zusammenfassung der für die Auswahl eines Bildanalyseverfahrens notwendigen Erkenntnisse

Die Randbedingungen und Anforderungen für ein Verfahren zur Strukturcharakterisierung für die eigenen Untersuchungen sind:

- Die Strukturcharakterisierung soll mittels eines bildanalytischen Verfahrens erfolgen.
- Mit dem Verfahren zur Bildanalyse wird die innere Asphaltstruktur im Ganzen erfasst (Gesteinskörnung, Asphaltmörtelphase und Hohlräume).

- Das Verfahren wird mit einem laborökonomisch vertretbarem Aufwand bei der Bilderfassung bezüglich Komplexität der Prüfeinrichtung, Zeitaufwand und Bedienbarkeit durchgeführt.
- Bei der Bildanalyse werden die für die Kraftübertragung primär relevanten Strukturen identifiziert und entsprechend berücksichtigt.
- Eine vollständige Neuentwicklung und Programmierung von Algorithmen für die Bildanalyse ist nicht vorgesehen.
- Es werden vorhandene internationale Ansätze mit positivem Erfahrungshintergrund genutzt.

Auf Basis der im Kapitel 2 referierten Grundlagen zur Strukturanalyse und insbesondere der Ergebnisse der Literatursynthese zu Analyseverfahren zur Strukturcharakterisierung für Asphalt im Kapitel 2.1.3.2 lassen sich folgende Erkenntnisse für die Auswahl einer für die Zielerreichung geeigneten Methodik zur Strukturanalyse festhalten:

- Verfahren zur 3 dimensionalen Bilderfassung (Stereokamera, CT, Laser, etc.) sind aufwendig und erfordern spezielle Kenntnisse in der Auswertung, um realistische Ergebnisse zu erhalten.
- International werden überwiegend Verfahren der 2 dimensional Digitalbilderfassung mit anschließender digitaler Bildanalyse zur Strukturcharakterisierung eingesetzt.
- Die bis zum Jahr 2012 entwickelten Ansätze zur Bildanalyse wiesen überwiegend Schwächen bezüglich der Genauigkeit, einer zu starken Abhängigkeit des Ergebnisses von manuellen Einstellungen (Subjektivität) und einer nutzerfreundlichen Anwendung auf.
- Grundsätzlich ist bezüglich der Kraftabtragung (und damit auch in Bezug auf den inneren Zusammenhalt des Asphalts) zunächst die Identifikation von „Kraftketten“ notwendig:
 - Nur zusammenhängende Gesteinskörner sind primär von Interesse; Gesteinskörnungen ohne jeglichen Kontaktpunkt sind vernachlässigbar, da sie nicht zur Tragstruktur und damit zur Lastübertragung beitragen (Zhu et al., 2000).
 - Der Einfluss der inneren Struktur auf Basis der Kraftketten, charakterisiert durch Kontaktpunkte /-längen auf die Spannungs-Dehnungsverteilung im Asphaltkontinuum wurde nachgewiesen (Zhu et al., 2000).
 - Der Zusammenhang zwischen den strukturbedingten mikromechanischen Eigenschaften des Asphalts und der Reaktion auf mechanische Beanspruchung wurde bereits in diversen Arbeiten untersucht (Tashman, Masad, Little&Zabib 2004; Wang et al. 2004).
- Ein bestehendes Softwaretool (iPas²) vereint automatisierte Bildverarbeitung und -analyse und ermöglicht die Analyse des Asphaltskeletts (definiert als innere Gesteinsstruktur, über die hauptsächlich die Lastabtragung über Kraftketten erfolgt (Coenen, Kutay&Bahia, 2011, Coenen et al., 2012)).

- Das Softwaretool wird als ein entscheidender Meilenstein bei der laborökonomischen Anwendung der Strukturcharakterisierung von Asphalt mittels 2 dimensionaler Digitalbildanalyse beurteilt.
- Erste Zusammenhänge zwischen den mittels iPas² ermittelten Strukturindizes und ausgewählten Gebrauchseigenschaften des Asphalts (Spurinnenbildung, Widerstand gegenüber Kälterissbildung) wurden identifiziert.
- Die Verwendung des Softwaretools iPas² wird als sinnvoll und zielführend angesehen.

3 Grundlagen zur Asphaltmörtelcharakterisierung

3.1 Definition Asphaltmörtel

Der Straßenbaustoff Asphalt ist ein Gemisch aus Mineralstoffen, also groben und feinen Gesteinskörnungen, und dem Bindemittel Bitumen. Bei der Herstellung des Gemisches lagert sich Bitumen an das Gestein an und es dringen feine Gesteinspartikel in das Bitumen ein. Als „Asphaltmastix“ wird in diesem Zusammenhang das Gemisch aus Bitumen und Füller (Gesteinspartikel mit Durchmesser $< 0,063\text{ mm}$) bezeichnet, und als „Asphaltmörtel“ das Gemisch aus Bitumen, Füller und Sand (Gesteinspartikel mit Durchmesser $< 2\text{ mm}$).

Zur vollständigen Beschreibung des Gebrauchsverhaltens von Asphalt ist die Kenntnis über das Materialverhalten der Einzelkomponenten (Bitumen und Gestein), sowie das Materialverhalten auf den verschiedenen Wirkungsebenen dieser Einzelkomponenten notwendig. Ausgehend von der Betrachtung des Gebrauchsverhaltens der Straße (Makroebene; Kontinuum) kann das Materialverhalten auf hierarchischen, sich überlappenden Ebenen betrachtet werden. In einem solchen Mehrskalenmodell wird das Materialverhalten der Asphaltebene (Meso 2 Ebene) von der nächsttieferen Asphaltmörtelebene (Meso Ebene 1) und diese wiederum von der darunterliegenden Mastixebene (Mikroebene) bestimmt (vgl. Abbildung 22).

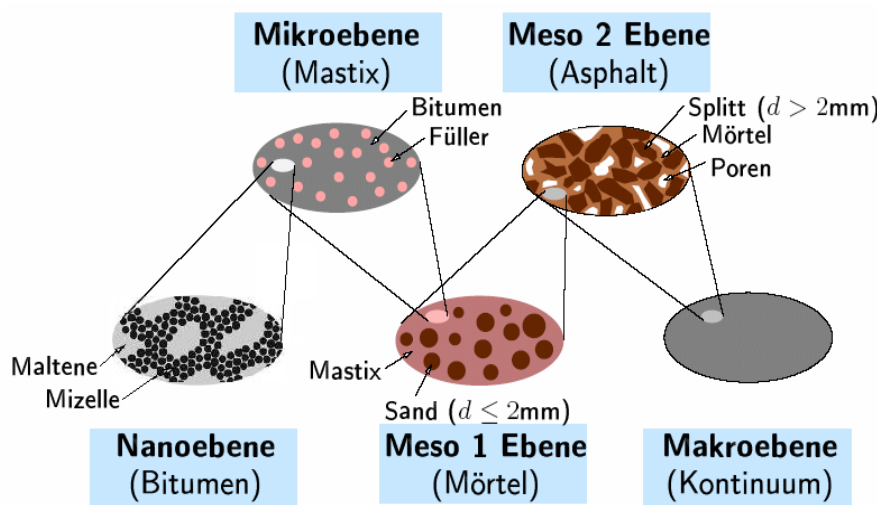


Abbildung 22. Mehrskalenmodell zur vollständigen Beschreibung des Gebrauchsverhaltens von Asphalt mittels Analyse des Materialverhaltens der Einzelkomponenten auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen (Lackner et al., 2004).

Die Asphaltmastix beziehungsweise der Asphaltmörtel erfüllt im Asphalt unterschiedliche Funktionen. Weil eine Differenzierung der unterschiedlichen Wirkungen von Mastix und Mörtel kaum möglich ist, steht im Folgenden allein der Begriff Asphaltmörtel – wenn nicht explizit auf anderes hingewiesen wird – stellvertretend für die Begriffe Asphaltmastix und Asphaltmörtel.

3.2 Funktion des Asphaltmörtels

In der Mehrzahl von Asphaltmischgutzusammensetzungen hat der Asphaltmörtel eine stabilisierende Wirkung. Er verklebt bei Walzasphalten die einzelnen groben Gesteinskörner an

ihren Kontaktpunkten miteinander und stützt das primäre Traggerüst des Gesteinsskeletts ab, so dass einwirkende Kräfte über die Kontaktpunkte der Gesteinskörner schadlos abgetragen werden können. In Gussasphalt sind alle Gesteinskörner gänzlich im Asphaltmörtel eingebettet. Die zähe Masse des Mörtels wird durch die Gesteinskörner versteift. Es entsteht eine (weitgehend) hohlraumfreie, verformungsstabile und gegen Kälterisse resistente Asphalt-schicht.

Die im fertigen Asphalt wirkenden Bindemittleigenschaften resultieren aus dem Zusammenwirken von Bitumen und der feinen Gesteinskörnung (Füller und Sand). Das Bitumen, der Füller und der Sand nach Art und Mengenanteilen beeinflussen somit die rheologischen Eigenschaften des Asphaltmörtels und damit auch die mechanischen Eigenschaften des damit hergestellten Asphalts. Je mehr Asphaltmörtel in der Asphaltmischung enthalten ist, desto entscheidender kann die Qualität des Asphaltmörtels für die Qualität des damit hergestellten Asphaltmischgutes beziehungsweise die Qualität der Asphaltbefestigung sein.

Zur Aufgabe von Asphaltmörtel im Asphaltmischgut sind zwei Theorien allgemein anerkannt. Nach der Theorie der Hohlraumminimierung füllen die feinen Gesteinskörnungen den Hohlraum zwischen den großen Gesteinskörnungen, um dadurch ein dichtes und festes Korngerüst zu erhalten (Arand, 1971). Zum anderen wird der Asphaltmörtel als Gemisch aus feinen Gesteinskörnungen und Bitumen als vorrangig verkittendes Element der Gesteinskörnungen gesehen (Mörteltheorie). In der auf Neumann (1929) und Wilhelmi (1931) zurückgehenden Mörteltheorie wird dem Asphaltmörtel primär eine versteifende Wirkung zugeordnet. Nach diesem Deutungsansatz stehen die Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen viel stärker im Vordergrund, als nach der Theorie der Hohlraumminimierung, bei der vorwiegend die Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnung und in Verbindung der Einfluss der spezifischen Oberfläche eine Rolle spielen. Nach der Mörteltheorie wirkt die feine Gesteinskörnung versteifend auf das Bindemittel. Konkret erhöht sich die resultierende Viskosität des Asphaltmörtels, wodurch dessen Fließneigung vermindert wird.

Die versteifende Wirkung des Füllers wird auf unterschiedliche Effekte zurückgeführt. Zum einen wird von der Bildung diffus strukturierter Hüllen vorwiegend bestehend aus Asphaltenen ausgegangen, die sich an der Fülleroberfläche durch Adsorption und Adhäsion bilden. Ab einer kritischen Volumenkonzentration bilden die Füllerpartikel eine neue Koagulationsstruktur (Rehbinder und Michajlow, 1961). Zum anderen lässt sich die versteifende Wirkung auf Basis des theoretisch von Einstein (1906) hergeleiteten Zusammenhangs zwischen der Viskositätssteigerung von Flüssigkeiten und der Volumenkonzentration starrer, sphärischer und isodiametrischer Teilchen rechnerisch bestimmen.

3.3 Einflussfaktoren auf die Asphaltmörtelviskosität und Auswirkung im Asphalt

Auf Basis der nachfolgenden Literaturstudie zählen zu den Faktoren, die sich direkt beziehungsweise indirekt in Verbindung mit anderen Einflüssen auf die Viskosität von Asphaltmörtel auswirken:

- geometrische Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung (Korngrößenverteilung, Kornform, Oberflächentextur, spezifische Oberfläche, Lagerungsdichte),
- physikalisch-chemische Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung (Dichte, Rohdichte, Rütteldichte, Verdichtungswilligkeit (Hohlraumgehalt nach Ridgen), Gesteinsart, Polarität, Ph-Wert, etc.),
- Mischungsverhältnis zwischen dem Bindemittel und den feinen Gesteinskörnungen (Bindemittelüberschuss),
- Bindemittleigenschaften, primär Viskosität (im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt).

Die Asphaltmörtelviskosität wiederum hat Auswirkungen auf das Materialgefüge und folgende resultierende Eigenschaften:

- Verarbeitbarkeit / Mischbarkeit des Mörtels und des Asphalts,
- verklebende Wirkung,
- Ermüdungs- und Verformungseigenschaften,
- Haftverhalten und Wasserempfindlichkeit.

Die Asphaltmörtelviskosität ist eine maßgebende Asphaltmörteleigenschaft im Hinblick auf dessen Funktion im Traggerüst (primäre Lastabtragung im Mastix Konzept vs. das Korngerüst punktuell verklebende Funktion im Stützgerüst Konzept). Neben der Bitumenviskosität wird die Asphaltmörtelviskosität von den granulometrischen und mineralogischen Eigenschaften des Füllers bestimmt. Bereits seit den 1930er Jahren wurden Studien über den Einfluss des Füllers auf die Viskosität von Asphaltmörtel durchgeführt, wobei der Fokus der Arbeiten auf der Ansprache und der Bewertung von Füllereigenschaften wie spezifische Oberfläche, Bindemittelbedarf und Lagerungsdichte lag (Pöbel, 1929; Wichert, 1929; Gonell 1934a, 1934b; Schindler, 1939; Ruck, 1962; Holl, 1963, 1965; Ewers, 1964; Schuhbauer, 1966; Arand, 1971; Suss, 1971; Wagner, 1974).

Rigden (1954) entwickelte das Konzept des "Bindemittelüberschusses". Nach diesem wird diejenige Bindemittelmenge betrachtet, die notwendig ist, die Hohlräume im trockenen und dicht gepackten Füller auszufüllen. Der in den Kornporen und Hohlräumen befindliche Bindemittelanteil wird als "gebunden" bezeichnet, während der fließfähige Bindemittelanteil (Überschuss) als Maß für die Viskosität verwendet wird. Hiernach besitzt ein Asphaltmörtel mit einem hohen Bindemittelüberschuss eine entsprechend niedrige Viskosität. Die maximale Asphaltmörtelviskosität wird auf Basis dieses Ansatzes erreicht, wenn die Hohlräume des Füllers bei dichtester Lagerung durch das Bindemittel vollständig ausgefüllt sind. Die Asphaltmörtelviskosität hängt demnach maßgeblich vom Packvolumen (Lagerungshohlraum) der feinen Gesteinskörnung ab.

Größe und Struktur des Lagerungshohlraums ergeben sich in Abhängigkeit von den granulometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung (Größe, Kornform, Korngrößenverteilung). So resultiert die Verwendung von Füllern mit kleiner Korngröße in sehr feinen Lagerungshohlräumen mit kleinen Porengrößen und einer hohen Anzahl an Kontaktpunkten zwischen den Füllerpartikeln. Neben der Größe des Lagerungshohlraums wirkt sich der Bindemittelbedarf der feinen Gesteinskörnung auf die resultierende Asphaltmörtelviskosität

aus. In Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit der Füllerpartikel, ergibt sich beispielsweise für raue, offenporige Füller ein höherer Bindemittelbedarf im Vergleich zu Füllerpartikeln mit dichter Oberflächentextur (Wagner, 1974).

Der Zusammenhang zwischen der Mischarbeit und der Verarbeitbarkeit (eigentlich Mischviskosität) – also letztlich der eingebrachten Verdichtungsarbeit – wurde u. a. von Steinhoff (1977) untersucht. Ein klarer Zusammenhang zwischen Mischviskosität und Füller-/Sandart wurde nachgewiesen. Feix (1979) kam zur selben Erkenntnis und stellte den signifikanten Einfluss der Füller- und Sandeigenschaften wie Gesteinsart, Oberflächenrauigkeit und Kornform auf die Verdichtungswilligkeit und die resultierenden Hohlraumgehalte heraus. Auch Arand und Renken (1980) kamen zu dem Schluss, dass insbesondere die geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen sich auf die Verdichtungswilligkeit wesentlich auswirken. Arand und Kiekenap (1981) wiesen zudem nach, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Verdichtungswiderstand von Asphalt und der Fließzahl des eingesetzten Sandes besteht. Die Fließzahl ist dabei die versteifende Wirkung eines Sandes, ausgedrückt als die Zeit, die eine bestimmte Menge des Sandes durch eine Auslaufdüse mit definiertem Durchmesser fließt. Den Zusammenhang zwischen dem Verdichtungswiderstand und der Fließzahl bestätigten Krass (1990) und Eckers (2004) durch ihre Untersuchungen, jedoch konnte keine direkte Abhängigkeit zwischen dem Fließverhalten der feinen Gesteinskörnungen und dem Verformungsverhalten des Asphalts erkannt werden. Dagegen wurde schon sehr früh eine Abhängigkeit des Verformungswiderstands von Asphalt von der Kornform nachgewiesen. So wirkten sich beispielsweise Natursande ungünstig im Vergleich zu Brechsanden auf die Festigkeiten im Triaxialversuch aus (Lottman et al., 1956; Shklarsky et al., 1964).

Bisher standen bei einem großen Teil der Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Asphaltmörtelviskosität die geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen (Füller, Sand) im Fokus. Daneben existiert eine Vielzahl weiterer Untersuchungen, in denen der Einfluss der geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen auf die resultierenden Gebrauchseigenschaften von Asphalt direkt betrachtet wurde. Eine getrennte Betrachtung des Einflusses der Asphaltmörtelviskosität und der geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung auf den Asphalt ist praktisch nicht möglich, da beide Faktoren eng miteinander verknüpft sind. Es ist daher sinnvoll, einen Überblick über ausgewählte Erkenntnisse zum Einfluss von geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung auf die Asphalteigenschaften zu gewinnen.

Die Vorteile von gebrochenen feinen Gesteinskörnungen im Vergleich zu rundem Natursand bezüglich der resultierenden Asphaltstabilität wiesen Campen und Smith schon 1948 mittels einaxialen Druckversuchen nach. Ishai und Gellber (1982) charakterisierten auf Basis des Konzepts des Packvolumens (Ridgen) die geometrische Unregelmäßigkeit für eine breite Auswahl an Gesteinsarten und untersuchten den Zusammenhang anhand von Marshallstabilität, Steifigkeit und statischer Spaltzugfestigkeit des Asphalts. Mit zunehmender geometrischer Unregelmäßigkeit wurden signifikant höhere Marshallstabilitäten festgestellt, während kein Einfluss auf die Steifigkeiten und Spaltzugfestigkeiten identifiziert wurde. Dagegen zeigten Kalcheff und Tunnicliff (1982) einen vorteilhaften Einfluss von Brechsand im Vergleich zu Natursand auf den Verformungswiderstand, auf die Spaltzugfestigkeit und auf die Ermü-

dundungsbeständigkeit des Asphalts. Ähnliche Zusammenhänge wurden von Winford (1991) mittels statischen Kriechversuchen erkannt. Lefebure (1957) untersuchte den Einfluss der geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung (Brechsand im Vergleich zu Natursand) auf die Marshallstabilität, wonach sich der Anteil der feinen Gesteinskörnung und deren geometrischen Eigenschaften als Haupteinflussfaktoren zeigten. Kandal et al. (1991) wiesen nach, dass Asphalte mit einem Anteil an rundem Natursand unter 20 % bessere Gebrauchseigenschaften aufwiesen, als jene mit einem Anteil über 20 %.

Darüber hinaus konnte in zahlreichen Untersuchungen der Einfluss der geometrischen Eigenschaften der **groben** Gesteinskörnung und der Einfluss aus der Kombination aus feiner und grober Gesteinskörnung auf ausgewählte mechanische Asphalteigenschaften nachgewiesen werden, wie Zusammenstellungen von Prowell et al. (2005) und Masad et al. (2005) zeigen.

Die meisten Untersuchungsergebnisse belegen die These, dass den geometrischen Eigenschaften, charakterisiert durch Kornform, Kantigkeit und Oberflächentextur eine große Bedeutung hinsichtlich der Steuerung und Kontrolle der resultierenden Gebrauchseigenschaften des Asphalts zukommt. Weiterhin wirken sich die geometrischen Parameter unterschiedlich stark auf die Gebrauchseigenschaften aus. In den meisten Fällen führt die Verwendung von kantigen und geometrisch unregelmäßigen Gesteinskörnungen im Vergleich zu runden oder plattigen Gesteinskörnungen zu vorteilhaften Gebrauchseigenschaften von Asphalt.

Die Literatur liefert teils widersprüchliche Erkenntnisse. Beispielsweise wird einerseits kein nachweisbarer Einfluss der geometrischen Eigenschaften auf das Verformungsverhalten von Asphalt (bspw. Eckers, 2004) festgestellt. Andererseits wurde ein klarer Zusammenhang diesbezüglich nachgewiesen (bspw. Prowell et al., 2005). Dies ist ein Indiz, dass es letztlich nicht ausreicht, anhand der geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen allein auf die Verdichtungseigenschaften und das resultierende Materialverhalten von Asphalt zu schließen. Vielmehr dürfte der Einfluss der Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung – vorrangig der granulometrischen Eigenschaften – in Verbindung mit den Bindemittleigenschaften zu betrachten sein, letztlich also das Verhalten des Asphaltmörtels bezüglich seiner Viskosität. Die Asphaltmörtelviskosität dürfte sich in der Folge auf die Verdichtbarkeit und die innere Asphaltstruktur insgesamt auswirken. Die Verknüpfung und prüftechnische Ansprache der Asphaltmörtelviskosität und der inneren Asphaltstruktur erscheint daher als zielführend, um das Gebrauchsverhalten von Asphalt prognostizieren und optimieren zu können.

In neueren Studien wurde ein maßgebender Einfluss des Asphaltmörtels auf ausgewählte Asphalteigenschaften festgestellt, konkret auf die Ermüdungs- und Verformungseigenschaften (Kandal et al., 1998; Kim et al. 2003; Shenoy et al., 2003; Montepara et al., 2011) und auf das Haftverhalten bzw. die Wasserempfindlichkeit (Kandal et al., 1998; Aljassar et al., 2004; Prowell et al., 2005; Airey et al., 2008).

Anscheinend wirkt sich die Kombination aus der Asphaltmörtelviskosität – neben den Bindemittleigenschaften primär bestimmt durch die geometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnungen – und den geometrischen Eigenschaften der groben Gesteinskörnung (vor allem Kornform, -orientierung und Oberflächentextur) entscheidend auf die Gebrauchseigenschaften von Asphalt aus.

3.4 Rheologische Charakterisierung

Die Asphaltmörtelviskosität als rheologische Materialeigenschaft wird vorrangig von den granulometrischen Eigenschaften der feinen Gesteinskörnung beeinflusst (vgl. Abschnitt 3.3). Der Asphaltmörtel zeigt in Abhängigkeit der Temperatur und der Belastung ein viskoelastisch-plastisches Materialverhalten. Die Grundlagen zur rheologischen Beschreibung eines derartigen Materialverhaltens werden im Folgenden beschrieben.

3.4.1 Grundlagen der Rheologie

Rheologie bezeichnet die Lehre über die mathematische Beschreibung der Verformungsvorgänge von Materialien unter Belastung und ist Teilgebiet der Physik, beziehungsweise im Speziellen der Mechanik, da die relevanten Messgrößen Kräfte, Auslenkungen und Geschwindigkeiten aus diesem Teilgebiet stammen (Mezger, 2012).

Das Verformungsverhalten realer Stoffe unter Last kann physikalisch-mathematisch sehr genau beschrieben werden. Dazu werden einfache Grundmodelle formuliert, die rein elastisches, plastisches oder viskoses Verhalten darstellen (Abschnitte 3.4.1.1 bis 3.4.1.3). Durch die Kombination der Grundmodelle entstehen rheologische Modelle, die das Materialverhalten in verschiedenen Belastungssituationen beschreiben. Zur Beschreibung des viskoelastisch-plastischen Materialverhaltens von Asphaltmörtel sind vorrangig drei rheologische Modelle von Relevanz, die in den Abschnitten 3.4.1.4 bis 3.4.1.6 referiert werden.

3.4.1.1 Elastizität

Ein ideal elastischer Körper verformt sich ohne Verzögerung durch eine äußere Last. Durch eine anschließende Entlastung bildet sich die Verformung spontan und vollständig in den Ursprungszustand zurück. Dies wird als reversible Verformung bezeichnet, da die durch die Veränderungen gewonnene Energie temporär als elastische Energie gespeichert und anschließend wieder zurück gewonnen werden kann (DIN, 1994). Das elastische Verhalten wird physikalisch mit der Hooke'schen Feder repräsentiert. Die Hook'sche Feder ist eine dicht gewickelte, masselose Spiralfeder, die die Proportionalität zwischen einwirkender Kraft und resultierender Längenänderung durch den Elastizitätsmodul beschreibt (Abbildung 23).

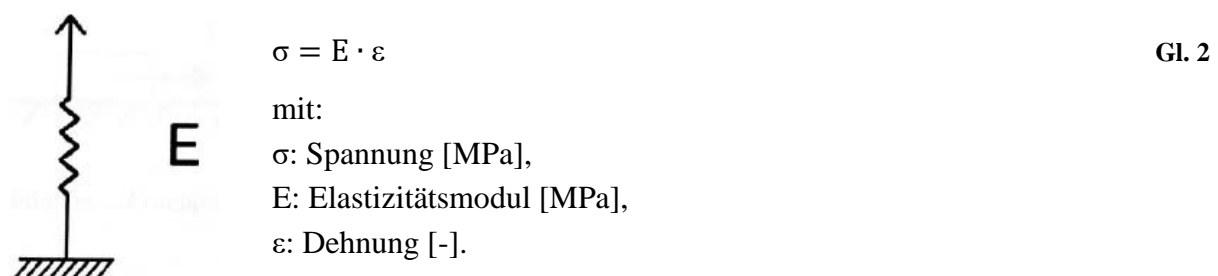


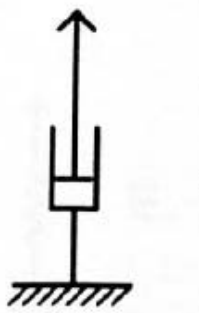
Abbildung 23. Schematische Darstellung der Hooke'schen Feder zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens.

3.4.1.2 Viskosität

Die Viskosität dient als Maß für die Fließfähigkeit einer Flüssigkeit. Ein flüssiger Zustand wird entsprechend durch eine niedrige Viskosität, ein sehr zäher Zustand durch eine hohe Viskosität beschrieben.

Ideal viskoses Materialverhalten liegt vor, wenn sich Körper zeitabhängig durch äußere Krafteinwirkungen verformen. Diese verzögerte Deformation ist entgegen der reversiblen Veränderungen der ideal elastischen Körper irreversibel, d.h. die Verformungen bleiben nach der Entlastung des Körpers erhalten. Hierbei wird die durch die Verformung entstehende Energie in Wärmeenergie umgewandelt (DIN, 1994; Reiner, 1969).

Zur physikalischen Beschreibung dient der Newton-Dämpfer. Um das viskose Verhalten des Körpers zu beschreiben, wird ein sogenannter Newton-Dämpfer verwendet (Abbildung 24). In einer rein-viskosen Flüssigkeit, welche einen endlosen Zylinder füllt, wirkt ein masseloser Kolben als Dämpfungsglied (Reiner, 1969).



$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}$$

Gl. 3

mit:

σ : Spannung [MPa],

η : Viskosität [MPa*s],

$\dot{\epsilon}$: Dehnungsänderung [s^{-1}].

Abbildung 24. Schematische Darstellung des Newton 'schen Dämpfer zur Beschreibung des viskosen Materialverhaltens.

3.4.1.3 Plastizität

Plastizität beschreibt die Eigenschaft von Körpern, sich erst dann unter äußerer Krafteinwirkung irreversibel zu verformen, wenn diese Kraft größer als die internen Bindungskräfte des Körpers ist. Solange die Kraft geringer ist, verhält sich der Körper starr und wird nicht deformiert. Zur physikalischen Beschreibung des ideal-plastischen Verhaltens dient der Reibungskörper nach Saint-Venant (Abbildung 25). Dieser ist ein auf einer rauen Fläche ruhendes, masseloses Reibungselement, auf welches eine parallel wirkende Kraft aufgebracht wird (Mezger, 2006; Reiner 1969).

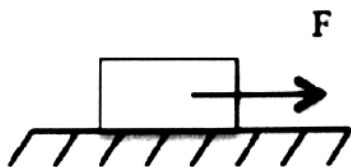
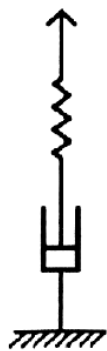


Abbildung 25. Schematische Darstellung des Reibungselement nach Saint-Venant zur Beschreibung des plastischen Materialverhaltens.

3.4.1.4 Maxwell-Modell

Werden die Grundmodelle von Feder und Dämpfer in Reihe geschaltet, entsteht das Maxwell-Modell (Mezger, 2006), (Abbildung 26). Die einwirkende Spannung wirkt auf beide Elemente gleich, die resultierende Dehnung setzt sich aus den beiden Einzeldehnungen zusammen (Gl. 4).

Das Maxwell-Modell eignet sich zur Beschreibung viskoelastischen Materialverhaltens. Unter Belastung erfährt das viskoelastische Material zunächst eine durch das elastische Federelement verursachte, spontane und reversible Anfangsdeformation. Bei gleichbleibender Belastung bildet sich eine Deformation am viskosen Dämpfer, welche mit zunehmender Belastungsdauer irreversibel ist.



$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$$

Gl. 4

mit:

$\dot{\varepsilon}$: Dehnungsänderung [s^{-1}],

$\dot{\sigma}$: Spannungsänderung [$MPa \cdot s^{-1}$],

E: Elastizitätsmodul [MPa],

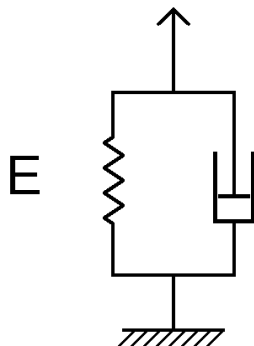
σ : Spannung [MPa],

η : Viskosität [$MPa \cdot s$].

Abbildung 26. Schematische Darstellung des Maxwell-Modells zur Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens.

3.4.1.5 Voigt-Kelvin-Modell

Durch die Parallelschaltung von Feder und Dämpfer entsteht das Voigt-Kelvin-Modell (Abbildung 27). Die Parallelschaltung bedingt, dass beide Elemente dieselbe Dehnung erfahren, sich jedoch die aufgebrachte Spannung unterschiedlich auf die beiden Elemente verteilt (Gl 5).



$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$

Gl. 5

mit:

σ : Spannung [MPa],

E: Elastizitätsmodul [MPa],

ε : Dehnung [-],

η : Viskosität [$MPa \cdot s$],

$\dot{\varepsilon}$: Dehnungsänderung [s^{-1}].

Abbildung 27. Schematische Darstellung des Voigt-Kelvin-Modells zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens von Asphaltmörtel.

Das Voigt-Kelvin-Modell wird zur Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens von Feststoffen verwendet. Während der Belastung verformen sich die Elemente gleichzeitig, da diese über einen Rahmen miteinander verbunden sind. Viskoelastische Stoffe weisen nach der Belastung eine zeitverzögerte aber vollständige Rückdeformation auf. Die Zeitverzögerung entsteht bei der Entlastung des Körpers durch die dämpfende Wirkung des Dämpfers auf die Feder (Mezger, 2006).

3.4.1.6 Burgers-Modell

Das Burgers-Modell resultiert aus der Reihenschaltung von Voigt-Kelvin- und Maxwell-Modell (Abbildung 28). Die einwirkende Kraft wirkt auf beide Modelle gleich, die resultierende Dehnung setzt sich aus den beiden Einzeldehnungen zusammen. Mit der Definition der Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ (Gl. 6) folgt die mathematische Beschreibung des Burgers-Modell (Gl. 7).

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 \quad \text{mit} \quad \dot{\epsilon}_1 = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad \text{und} \quad \dot{\epsilon}_2 = \frac{\sigma}{\eta} \quad \text{Gl. 6}$$

mit:

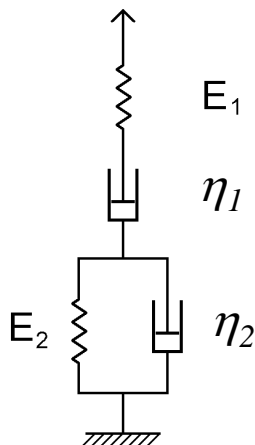
$\dot{\epsilon}$: Dehnungsänderung [s^{-1}],

$\dot{\sigma}$: Spannungsänderung [$MPa \cdot s^{-1}$],

E: Elastizitätsmodul [MPa],

σ : Spannung [MPa],

η : Viskosität [$MPa \cdot s$].



$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \frac{\dot{\sigma}}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} + \frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_2}{\eta_1} \cdot \epsilon_{vel} \quad \text{Gl. 7}$$

mit:

E_1 : Elastizitätsmodul des Maxwell-Modells [MPa],

E_2 : Elastizitätsmodul des Voigt-Kelvin-Modells [MPa],

η_1 : Viskosität des Maxwell-Modells [$MPa \cdot s$],

η_2 : Viskosität des Voigt-Kelvin-Modells [$MPa \cdot s$],

ϵ_{vel} : Viskoelastischer Dehnungsanteil [-].

Abbildung 28. Schematische Darstellung des Burgers-Modells zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens von Asphaltmörtel.

Mittels Burgers-Modells kann das Verhalten viskoelastischer Stoffe, die sich weder wie Festkörper noch wie Flüssigkeiten verhalten (bspw. Asphaltmörtel) beschrieben werden. Unter konstanter Belastung kann so das Kriech- und das Kriecherholungsverhalten charakterisiert werden (Reiner, 1969; Büchler, 2010).

Das Burgers-Modell liefert als Reaktion auf eine spontan aufgebrachte, konstante (Zug-)Spannung und nachfolgender plötzlicher Wegnahme der Spannung eine "klassische" Kriechkurve $\epsilon(t)$ mit anschließender Kriecherholungsphase (Abbildung 29). Dabei stellt die Steigung im linearen Verlauf der Kriechkurve die lineare (Zug)viskosität η_1 dar.

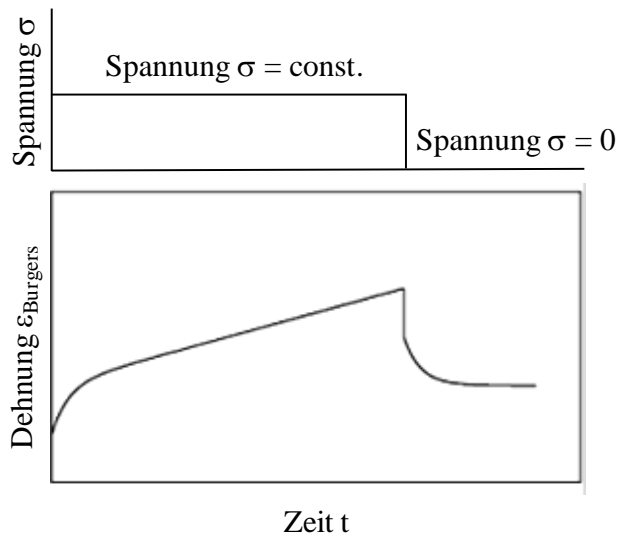


Abbildung 29. Viskoelastisches Materialverhalten beschrieben durch das Burgers-Modell als Reaktion auf eine konstante (Zug-)Spannung.

3.4.2 Rheologie des Asphaltmörtels

Eine rheologische Charakterisierung eines Asphaltgemisches ist aufgrund der inhomogenen Struktur und den sehr unterschiedlichen Abmessungen der einzelnen Bestandteile der Baustoffkomponenten (Füller, Sand, grobe Gesteinskörnung, Bitumen) nicht einfach möglich. Daher konzentrierte sich die Forschung und Entwicklung zunächst auf die rheologische Ansprache der Bindemittel. Hierzu wurden vor allem im Rahmen des Strategic Highway Research Programms (SHRP) fundamentale Prüfmethoden unter Verwendung des dynamischen Scherrheometers (DSR) und entsprechende Anforderungen und Kategorien entwickelt und ins Regelwerk überführt (Anderson et al., 1994). Die rheologische Charakterisierung und Kategorisierung der Bindemittel erfolgt hierbei jedoch überwiegend anhand nur einer bestimmten Temperatur beziehungsweise unter einem definierten Belastungsregime. Dies erscheint jedoch nicht ausreichend, wenn das rheologische Verhalten des Bindemittels in Kombination mit der feinen Gesteinskörnung untersucht werden soll. Die Kenntnis über das Spannungs-Dehnungsverhalten von Asphaltmörtel über einen weiten Temperaturbereich und bei unterschiedlichen Belastungszuständen ist allerdings essentiell, um den Einfluss auf die resultierenden Asphalteeigenschaften systematisch zu untersuchen.

In der Literatur finden sich diverse Untersuchungen über die mittels DSR bestimmten rheologischen Eigenschaften von Asphaltmörteln und Zusammenhänge mit dessen mechanischen Eigenschaften. Es wurde deutlich, dass die feinen Gesteinskörnungen nicht nur versteifend wirken, sondern sich die rheologisch-mechanischen Asphaltmörteleigenschaften in Abhängigkeit von Alterungsgrad, Belastungsart, Art der feinen Gesteinskörnung darstellen (bspw. Anderson et al., 1992; Harris und Stuart, 1995; Guber et al., 1999; Liao et al., 2013).

Weiterhin konzentrierten sich Untersuchungen zur Ansprache der rheologischen Asphaltmörteleigenschaften auf die Entwicklung und Formulierung von numerischen und analytischen Modellen zur Beschreibung der Asphaltmörtelviskosität (Delaporte et al., 2007; Hesami et al., 2012).

Inzwischen wurden auch rheologische Modelle entwickelt, die den Einfluss von gealtertem Bitumen und Asphaltmörtel aus Asphaltgranulat berücksichtigen und eine Quantifizierung ermöglichen, ohne die einzelnen Komponenten durch Extraktion und Destillation aufwendig trennen zu müssen (Cannone Falchetto et al., 2014).

Die Vielzahl an aktuellen Studien über die rheologischen Eigenschaften von Asphaltmörtel und die erfolgsversprechende Verwendung der mittels DSR gewonnenen rheologischen Parameter für die unterschiedlichen Untersuchungsaspekte zeigt das große Potential dieser Prüfmethodik.

Vor diesem Hintergrund erscheint für die eigenen Untersuchungen die prüftechnische Ansprache der rheologischen Eigenschaften des Asphaltmörtels mittels DSR zielführend.

4 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm wurde vor dem Hintergrund festgelegt, Asphalte mit einem großen Anwendungsbezug zu berücksichtigen und gleichzeitig die im ISBS-Labor verfügbaren Baustoffe zu nutzen. Daher wurden für die Asphalte Variationen bezüglich der Asphalt-schicht, der Gesteinsart, der Asphaltgranulatzugabe und der Additivzugabe berücksichtigt. Der resultierende Variationsumfang war ausreichend für vorgesehenen Untersuchungen.

Die grundlegenden Untersuchungsschritte waren:

1. Es wurden Asphalte unter Variation der Asphalt-schicht (Deckschicht, Binderschicht), der Gesteinsart (Gabbro, Kalkstein), der Asphaltgranulatzugabe (0 M.-% bis 60 M.-%) und der Additivzugabe (mit vs. ohne Wachsadditiv) hergestellt.
2. Aus den Asphalten wurden zylindrische und prismenförmige Asphalt-Probekörper hergestellt und mittels Flachbettscanner Digitalbilder der Probekörperquerschnitte (Mantelfläche am Zylinder; Längsschnitt am Prisma) gewonnen.
3. Die erfassten Bilder der Asphaltquerschnitte wurden einer digitalen Bildanalyse unterzogen und Indizes gewonnen, die die innere Asphaltstruktur hinreichend genau und zuverlässig abbilden.
4. An den bildtechnisch analysierten Asphaltvarianten wurden der Ermüdungswiderstand des Asphalts mittels Zug-Schwellversuch und der Verformungswiderstand mittels Triaxialversuch bestimmt.
5. Die mittels Bildanalyse gewonnenen Strukturindizes wurden mit den Parametern der unterschiedlichen Versagensmechanismen (Ermüdung, Verformung) auf mögliche Zusammenhänge untersucht.
6. An ausgewählten Asphaltvarianten wurde die Viskosität der entsprechenden Asphaltmörtelphase (Füller-Bitumen-Gemisch) mittels dynamischem Scherrheometer bestimmt, um einen möglichen Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf die innere Asphaltstruktur zu identifizieren.

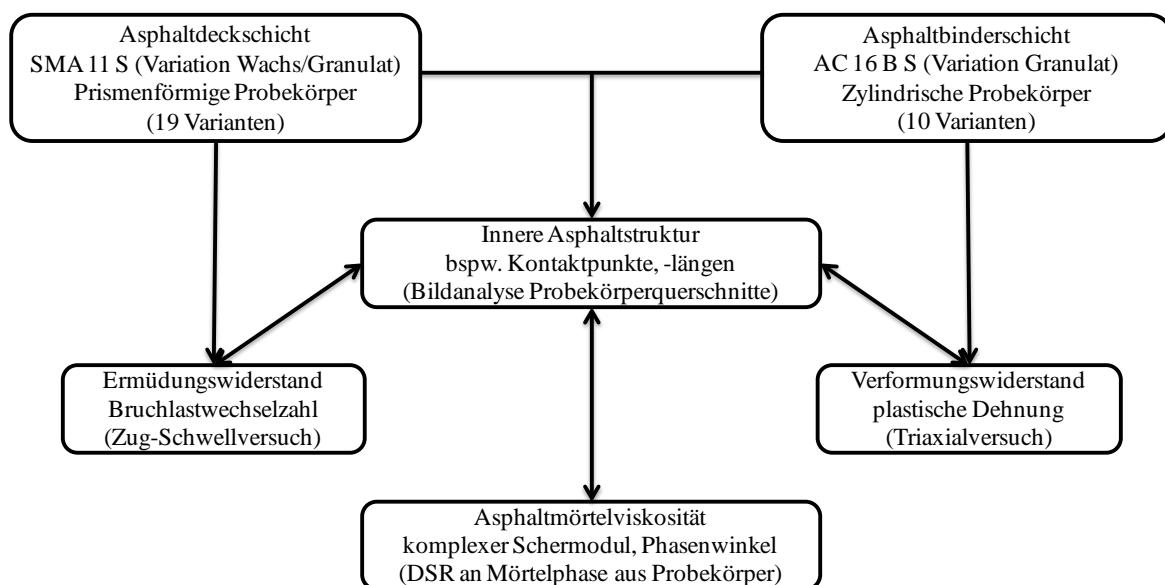


Abbildung 30. Untersuchungsschema zum Einfluss von innerer Struktur und Mörtelviskosität auf die Resistenz von Asphalt gegenüber Versagen.

Im Folgenden werden Details des Untersuchungsprogramms bezüglich der eingesetzten Baustoffe, der hergestellten Asphalte und Asphalt-Probekörper, sowie der Analyse- und Prüfverfahren zur Ansprache der inneren Asphaltstruktur, des Ermüdungs- und Verformungswiderstands dargelegt.

4.1 Eingesetzte Baustoffe

4.1.1 Gesteine

Zur Herstellung der unterschiedlichen Asphalte wurden Gabbro, sowie dolomitischer Kalkstein verwendet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Eingesetzte Gesteine

Variante	Gestein (Herkunft)	Verwendung
1	Gabbro (Bad Harzburg, Deutschland)	Herstellung von Splittmastixasphalt SMA 11 S (19 Varianten)
2	Dolomitischer Kalkstein (Sierning, Österreich)	Herstellung von Asphaltbinder AC 16 B S (10 Varianten)

4.1.2 Bitumen

Für die Herstellung der unterschiedlichen Asphalte kamen zwei unterschiedliche Polymermodifizierte Bitumen zum Einsatz (Tabelle 2).

Tabelle 2: Eingesetzte Bitumen

Variante	Bitumen	Verwendung
1	Polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 A	Herstellung von Splittmastixasphalt SMA 11 S (19 Varianten)
2	Polymermodifiziertes Bitumen 45/80-65	Herstellung von Asphaltbinder AC 16 B S (10 Varianten)

4.1.3 Wachsadditive

Es wurden zwei viskositätsverändernde organischen Zusätze verwendet: Fischer-Tropsch-Wachs und Amidwachs (Tabelle 3).

Tabelle 3: Eingesetzte Wachsadditive

Variante	Wachsadditiv	Verwendung
1	Fischer-Tropsch-Wachs (FT-Wachs)	Herstellung von Splittmastixasphalt SMA 11 S (14 Varianten)
2	Fettsäureamid (Amidwachs)	

Fischer-Tropsch-Wachse sind langkettige, aliphatische Kohlenwasserstoffe, die mit der Fischer-Tropsch-Synthese in einem katalytischen Hochdruckverfahren aus dem Synthesegas

(CO und H₂) gewonnen werden. Die Kettenlänge der FT-Moleküle unterscheidet sich von der Kettenlänge erdöleigener Paraffine. Daraus erklärt sich, dass FT-Paraffine andere physikalische Eigenschaften haben und nicht mit den paraffinischen Anteilen im Bitumen verglichen werden können. FT-Wachse sind oberhalb von 150 °C im Bitumen vollständig löslich, vermischen sich durch Rühren homogen mit dem Basisbitumen und senken dessen Viskosität im flüssigen Zustand. Während des Abkühlens kristallisieren FT-Wachse aus und bilden Kristallite im Bitumen, die die Stabilität und Verformungsbeständigkeit des Asphaltes erhöhen.

Fettsäureamide sind langkettige, aliphatische Kohlenwasserstoffe, die synthetisch hergestellt werden. Die Kettenlänge der Fettsäure-Moleküle unterscheidet sich ebenfalls von der Kettenlänge erdöleigener Paraffine. Daraus erklärt sich nach Angabe der Hersteller auch hier, dass Fettsäureamide nicht mit den paraffinischen Anteilen im Bitumen verglichen werden können. Fettsäureamide sind oberhalb von 140 °C im Bitumen vollständig löslich, vermischen sich wie auch die FT-Wachse durch Rühren homogen mit dem Basisbitumen und senken dessen Viskosität im flüssigen Zustand. Durch die kristallisierten Fettsäureamide im Bitumen, erhöht sich die Stabilität und Verformungsbeständigkeit des Asphaltes.



Fischer-Tropsch-Wachs



Amidwachs

Abbildung 31. Aussehen der eingesetzten viskositätsverändernden Zusätze (Wachse).

Die vom Hersteller genannten Eigenschaften dieser viskositätsverändernden organischen Zusätze sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Eigenschaften der eingesetzten viskositätsverändernden organischen Zusätze (Herstellerangaben)

Chemischer Typ	Fischer-Tropsch-Wachs (FT-Wachs)	Fettsäureamid (Amidwachs)
Hersteller	Sasol Wax GmbH	Clariant
Handelsname	Sasobit	Licomont BS 100
Produktbeschreibung	synthetische, gesättigte, langkettige Kohlenwasserstoffe (Fischer-Tropsch Wachs)	Gemisch aus Derivaten von Fettsäureamiden
Lieferform	Pastillen	Granulat
Farbe	gräulich-weiß bis gelblich	weiß / weißlich
Temperaturen des Erstarrungsintervalls	100 °C	135 - 142 °C (*)
Schmelzbereich	70 - 115 °C	139 - 144 °C

4.1.4 Asphaltgranulate

Zum Einsatz kamen insgesamt 6 Asphaltgranulate, die in Tabelle 3 näher spezifiziert sind. Die Asphaltgranulate D1 bis D3 wurden zur Herstellung von Asphaltmischgutvarianten für Asphaltdeckschichten SMA 11 S verwendet, die Asphaltgranulate B1, B3 und B4 dienten zur Herstellung von Asphaltmischgutvarianten für Asphaltbinderschichten AC 16 B S.

Tabelle 5: Eingesetzte Asphaltgranulate

Variante	Herkunft des Asphaltgranulats	Verwendung
D1	Fräsgut aus Sondermischgut auf Basis eines SMA; Bindemittel enthält FT-Wachs	Herstellung von Splittmastixasphalt SMA 11 S (16 Varianten)
D2	Fräsgut aus einem SMA 8 S, Polymermodifiziertes Bindemittel	
D3	Fräsgut aus einem AC 11 D mit Überkornanteil von >10 M.-%, Bindemittel enthält Polymere und FT-Wachs	
B1	Fräsgut aus einem AC 16 B S, Bindemittel enthält vermutlich Polymere	Herstellung von Asphaltbinder AC 16 B S (9 Varianten)
B3	Fräsgut aus einem AC 16 B S, Bindemittel enthält vermutlich Polymere	
B4	Fräsgut aus einem AC 16 B S, Bindemittel enthält vermutlich Polymere	

4.1.5 Asphaltherstellung

4.1.5.1 Asphaltmischgut

Die Auswahl der herzustellenden Asphaltmischgute erfolgte auf Basis der im Untersuchungszeitraum im ISBS-Labor verfügbaren Baustoffe. Trotz dieser Einschränkung konnten Asphaltmischgute hergestellt werden, die bezüglich ihrer Eigenschaften repräsentativ für die Untersuchungen waren und dadurch die Aussagekraft der Ergebnisse nicht limitiert ist.

Es wurden zwei unterschiedliche Asphaltsorten hergestellt:

- Asphaltmischgute für Asphaltdeckschichten SMA 11 S für die Untersuchungen zum Ermüdungswiderstand,
- Asphaltmischgute für Asphaltbinderschichten AC 16 B S für die Untersuchungen zum Verformungswiderstand.

Für die Untersuchungen zum Ermüdungswiderstand wurden Splittmastixasphalte SMA 11 S für Asphaltdeckschichten bei Variation der Art des wachsmodifizierten Asphaltgranulats in drei Stufen, der Zugabeanteile an Asphaltgranulat in drei Stufen (0 %, 20 % und 40 %) und der Art des Zugabebindemittels in drei Stufen (ohne Wachs, mit FT-Wachs, mit Amidwachs) hergestellt.

Der Variationsumfang und die Nummerierung der Asphaltgemische sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Variationsmatrix der für die Untersuchungen zum Ermüdungswiderstand hergestellten Asphaltmischgutvarianten für die Asphaltdeckschichten (SMA 11 S), 19 Varianten

Zugabe- bindemittel	Zugabeanteil	Asphaltgranulat D1	Asphaltgranulat D2	Asphaltgranulat D3
25/55-55 A ohne Wachs	0 M.-%	D01		
	20 M.-%	-	512	612
	40 M.-%	-	513	613
25/55-55 A mit 3 % FT-Wachs	0 M.-%	D02		
	20 M.-%	422	522	622
	40 M.-%	423	523	623
25/55-55 A mit 3 % Amidwachs	0 M.-%	D03		
	20 M.-%	432	532	632
	40 M.-%	433	533	633

Für die Untersuchungen zum Verformungswiderstand wurden Asphaltbinderschichtvarianten AC 16 B S bei Variation der Art des Asphaltgranulats in drei Stufen und des Zugabeanteils an Asphaltgranulat in drei Stufen (20 %, 40 % und 60 %) hergestellt. Die Bezeichnungen der so hergestellten Varianten zeigt Tabelle 7. Insgesamt ergaben sich zur weiteren Berücksichtigung im Rahmen der Untersuchungen zum Verformungswiderstand 9 Asphaltvarianten zusätzlich einer Referenzvariante (ohne Asphaltgranulat), insgesamt somit 10 Asphaltvarianten.

Tabelle 7: Variationsmatrix der für die Untersuchungen zum Verformungswiderstand hergestellten Asphaltmischgutvarianten für die Asphaltbinderschichten (AC 16 B S), 10 Varianten

Zugabeanteil Asphaltgranulat	20 M.-%	40 M.-%	60 M.-%
AC 16 B S + 45/80-65			
B1	B11	B12	B13
B3	B21	B22	B23
B4	B31	B32	B33

Da der Wassergehalt des Asphaltgranulats die Verarbeitbarkeit und die Homogenität des resultierenden Asphaltmischguts beeinflusst, wurden die Asphaltgranulate vor der Zugabe im Ofen getrocknet, sodass der Wassergehalt mit 0 M.-% angenommen werden kann.

Der Mischprozess im Labor erfolgte praxisnah mittels eines Doppelwellen-Zwangsmischers, dessen Mischwerkzeug jenem in der Asphaltmischanlage im Maßstab $M = 1:8$ nachgebildet ist (Abbildung 32).



Abbildung 32. Doppelwellen-Zwangsmischer (im Prüflabor des ISBS) zur praxisadäquaten Herstellung von Asphaltmischgut unter Zugabe von Asphaltgranulat (links); Detail Mischwerkzeug nachempfunden dem Mischwerk in einer Asphaltmischanlage im Maßstab $M = 1:8$ (rechts).

Zur Herstellung eines praxisadäquaten homogenen Asphaltmischguts ist eine ausreichend lange Mischdauer in Abhängigkeit von den Asphaltgranulat-Eigenschaften zu gewährleisten. Vor diesem Hintergrund wurde eine für alle Asphaltvarianten einheitliche Mischdauer von 120 Sekunden verwendet.

Die Mischgutrezepturen der Asphaltdeckschicht-Variante SMA 11 S ohne Asphaltgranulat wurden so gewählt, dass die entsprechenden Anforderungen an das Asphaltmischgut gemäß deutschem Regelwerk TL Asphalt-StB (FGSV, 2007) eingehalten sind. Die verwendeten Mischgutrezepturen unter Einhaltung der Anforderungen gemäß den TL Asphalt-StB sind in Abbildung 33 dargestellt.

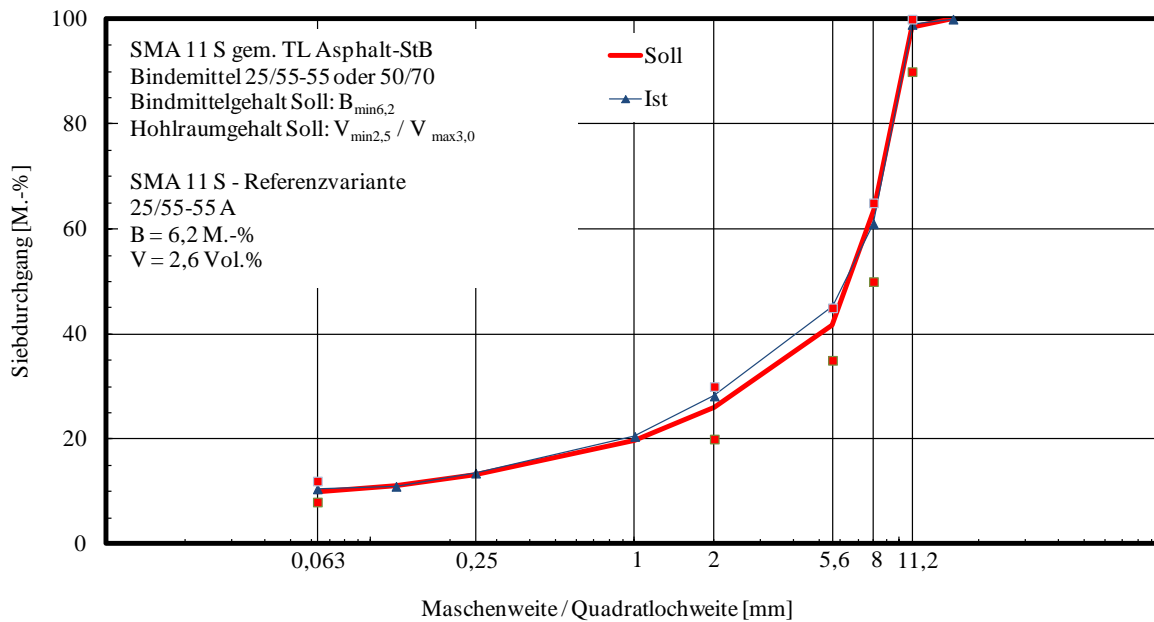


Abbildung 33. Mischgutrezeptur der Asphaltdeckschicht-Varianten SMA 11 S ohne Asphaltgranulat.

Die Mischgutrezepturen der Asphaltbinderschicht-Variante AC 16 binder ohne Asphaltgranulat wurden so gewählt, dass die entsprechenden Anforderungen an das Asphaltmischgut gemäß österreichischem Regelwerk RVS 08.97.05 (FSV, 2010) eingehalten sind. Die verwendeten Mischgutrezepturen unter Einhaltung der Anforderungen gemäß den RVS 08.97.05 sind in Abbildung 34 dargestellt.

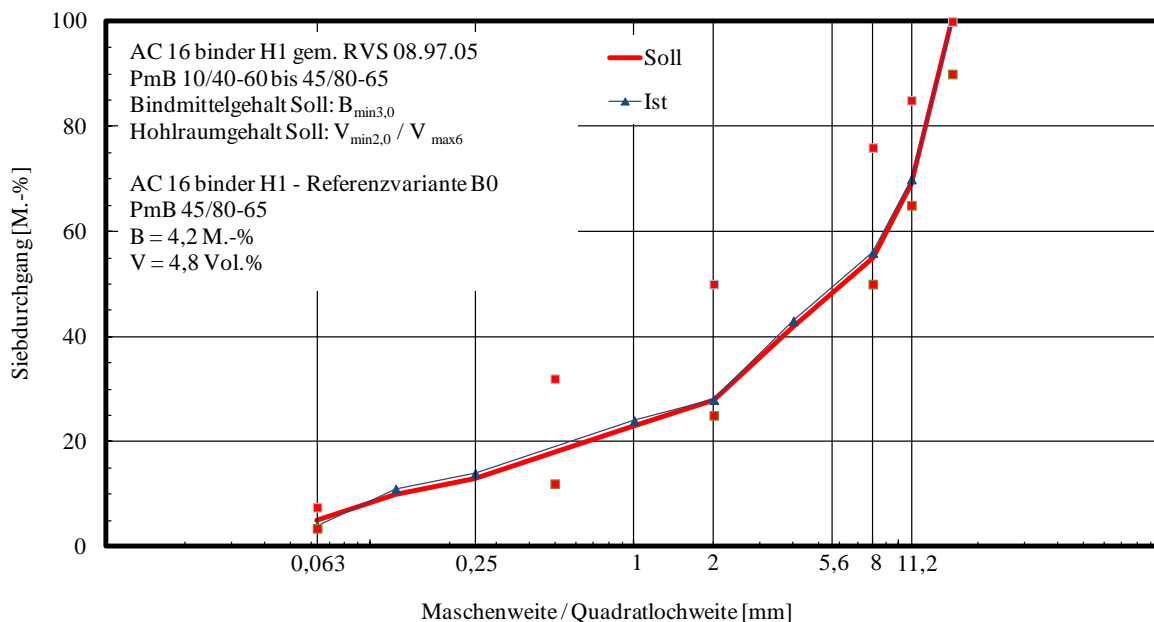


Abbildung 34. Mischgutrezeptur der Asphaltbinderschicht-Variante AC 16 binder H1 ohne Asphaltgranulat.

4.1.5.2 Asphalt-Probekörper

Die Herstellung der Asphalt-Probekörper erfolgte mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (FGSV, 2007). Mit dem am ISBS verwendeten Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht ein ausgezeichneter Erfahrungshintergrund, insbesondere auch zur Herstellung von großformati-

gen homogenen Asphalt-Probeplatten (siehe hierzu Ringleb, 2012 und Abbildung 35). Mit Hilfe des Walzsektor-Verdichtungsgeräts der neuesten Generation ist es möglich, Asphalt-Probeplatten mit einer Höhe von bis zu 300 mm in ausreichend homogener Qualität (bezüglich Hohlraumgehalt) herzustellen.

Es ist bekannt, dass während der Verdichtung die Gesteinskörner im Asphaltmischgut in Abhängigkeit von der eingebrachten Verdichtungsarbeit und Verdichtungsrichtung eine anisotrope Ausrichtung erfahren (Ringleb, 2012). Somit wird das Gebrauchsverhalten von Probekörpern, die aus laborverdichteten Asphalt-Probeplatten gewonnen werden, von der Wahl des Verdichtungsregimes und der gewählten Bohrrichtung der Probekörper aus den Asphalt-Probeplatten maßgeblich beeinflusst.

Es wurden daher im Rahmen dieser Arbeit möglichst großformatige, entsprechend dicke homogene Asphalt-Probeplatten mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt, aus denen vertikal beispielsweise zylindrische Probekörper gebohrt werden können (Abbildung 35). Für die prismenförmigen Asphalt-Probekörper wurden kleine Asphalt-Probeplatten mit den Abmessungen 300 mm x 200 mm x 40 mm hergestellt.

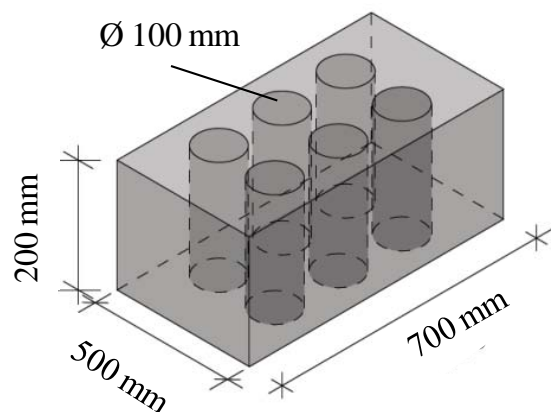


Abbildung 35. Walzsektor-Verdichtungsgerät am ISBS zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probeplatten (links), Gewinnung von zylindrischen Asphalt-Probekörpern aus einer Asphalt-Probeplatte durch senkrechtes Bohren (rechts).

Aus den walzsektor-verdichteten Asphalt-Probeplatten wurden anschließend

- prismenförmige Asphalt-Probekörper mit den Abmessungen 160 mm x 40 mm x 40 mm für die Zug-Schwellversuche zur Ansprache des Ermüdungswiderstands (Abschnitt 4.2.2.1) und
- zylindrische Asphalt-Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und mit einer Höhe von 200 mm für die späteren Triaxialversuche zur Ansprache des Verformungswiderstands (Abschnitt 4.2.2.2)

gewonnen.

4.2 Prüfungen der Baustoffe

4.2.1 Asphaltmörtelprüfungen

An ausgewählten Asphaltvarianten wurden die Viskosität der entsprechenden Asphaltmörtelphase (Füller-Bitumen-Gemisch) mittels dynamischem Scherrheometer (DSR) bestimmt, um einen möglichen Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf die innere Asphaltstruktur zu identifizieren.

Dazu wurden zunächst der Füller und das Bitumen der jeweiligen Asphalt-Probekörper mittels Extraktion und Destillation rückgewonnen. Da bei der Extraktion und Destillation nicht die vollständigen Mengen an Füller und Bitumen aufgrund von prüftechnisch bedingten Verlusten rückgewonnen werden können, wurden die aus der Asphaltrezeptur bekannten Füller:Bitumen-Verhältnisse herangezogen, um die entsprechende Asphaltmörtelphase genau zusammenzusetzen. Die Mengenanteile wurden mittels Waage auf 0,1 g genau bestimmt und der Füller und das Bitumen bei 180 °C für 30 Minuten temperiert. Anschließend erfolgte manuell die Vermischung der beiden Komponenten in einem Kasserolle mittels Glasstab über dem Bunsenbrenner.

Im Anschluss wurden die rheologischen Eigenschaften der Asphaltmörtel mittels DSR gemäß DIN EN 14770 bestimmt.

Das DSR besteht aus einer festen unteren Platte und einer dazu parallelen oberen, sich drehenden, kreisförmigen Platte. Zwischen den beiden Flächen dieser Platten wird kraftschlüssig eine Bindemittelprobe eingebaut (Abbildung 36).



Abbildung 36. Dynamisches Scherrheometer (DSR) mit Prüfgeometrie eines Platte-Platte-Mess-Systems mit einem Plattendurchmesser von 25 mm.

Für die Oszillationsmessungen wurde ein Temperatursweep im Bereich von +20 °C bis +110 °C bei einer konstanten Frequenz von 1,59 Hz durchgeführt. Die Prüfung wurde im spannungsgeregelten Modus bei kontinuierlich ansteigender Temperatur durchgeführt. Als Prüfgeometrie wurde ein Platte-Platte-Messsystem mit einem Plattendurchmesser von 25 mm und einer Spaltweite von 1 mm verwendet (Abbildung 36). Die Asphaltmörtelprobe wurde kontinuierlich mit einer Frequenz von 1,59 Hz oszillierend beansprucht. Während der Beanspruchung wurde die Temperatur in einem Temperaturbereich von 20 °C bis maximal 110 °C

kontinuierlich mit einer Temperaturrate von 1,2 K/min erhöht. Der Probekörper wurde über die gesamte Prüfdauer (von Beginn der Temperaturrampe) mit einer konstanten Scherspannung von 500 ± 5 Pa in Oszillation beansprucht. Während der Messung wurden die Werte des komplexen Schermoduls, des Phasenwinkels und der Temperatur sekundlich aufgezeichnet.

Durch die sinusförmige Belastung der Asphaltmörtelprobe wurden der komplexe Schermodul G^* und der Phasenwinkel δ ermittelt, um damit die viskoelastischen Eigenschaften zu beschreiben. Dabei ist der Phasenwinkel δ der zeitliche Versatz zwischen dem Aufbringen der Scherspannung τ und der sich daraus ergebenden Deformation γ (Abbildung 37 und Gl. 8). Viskoelastische Stoffe wie Asphaltmörtel weisen einen Phasenwinkel zwischen $0^\circ < \delta < 90^\circ$ auf. Dabei ist ein kleiner Phasenwinkel δ repräsentativ für ein überwiegend elastisches und ein großer Phasenwinkel δ für ein überwiegend viskoses Materialverhalten.

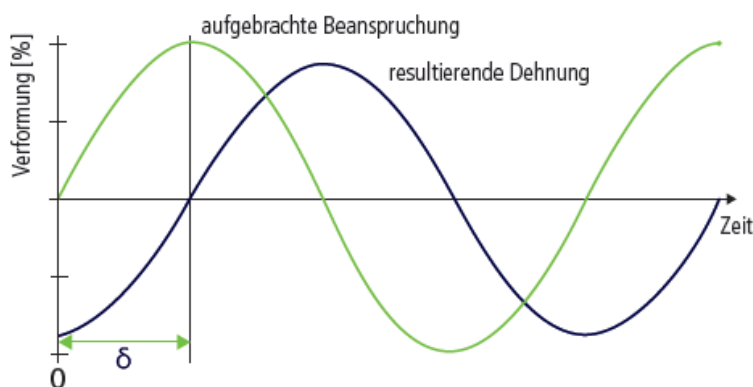


Abbildung 37. Prinzipskizze des Phasenwinkels δ (ARBIT, 2013).

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360^\circ$$

Gl. 8

mit:

δ : Phasenwinkel $[\circ]$,

t : Zeit für einen Sinusdurchlauf [s],

Δt : Zeitversatz [s].

Der komplexe Schermodul G^* stellt das Verhältnis der Spannung τ zur Verformung γ (Gl. 9) und den Widerstand gegen eine erzwungene Verformung der Probe dar. Steigt die Temperatur beziehungsweise sinkt die Frequenz, nimmt der komplexe Schermodul G^* ab. Bei zunehmender Viskosität η und nach thermisch -oxidativer Beanspruchung des Asphaltmörtels steigt er an.

$$|G^*| = \frac{\tau}{\gamma}$$

Gl. 9

mit:

G^* : komplexer Schermodul [Pa],

τ : Scherspannung [Pa],

γ : Deformation [-].

Die Viskosität η stellt den Zusammenhang zwischen der Scherspannung τ und der Scherrate $\dot{\gamma}$ dar (Gl. 10). Sie grenzt den Fließwiderstand der Materialprobe gegenüber der Relativbewegung der Moleküle ab, bedingt durch die aufgebrachte Scherspannung τ .

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Gl. 10

mit:

η : Viskosität [Pa·s],

τ : Scherspannung [Pa],

$\dot{\gamma}$: Scherrate [s^{-1}].

Weiterhin wurde zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften der Asphaltmörtel das auf Basis von Alisov (2017) entwickelte Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) angewendet. Dazu wurden für einen vorgegebenen komplexen Schermodul von 15 kPa die Äqui-Schermodul-Temperatur (T_{BTSV}) und der zugehörige Phasenwinkel (δ_{BTSV}) ermittelt (Abbildung 38).

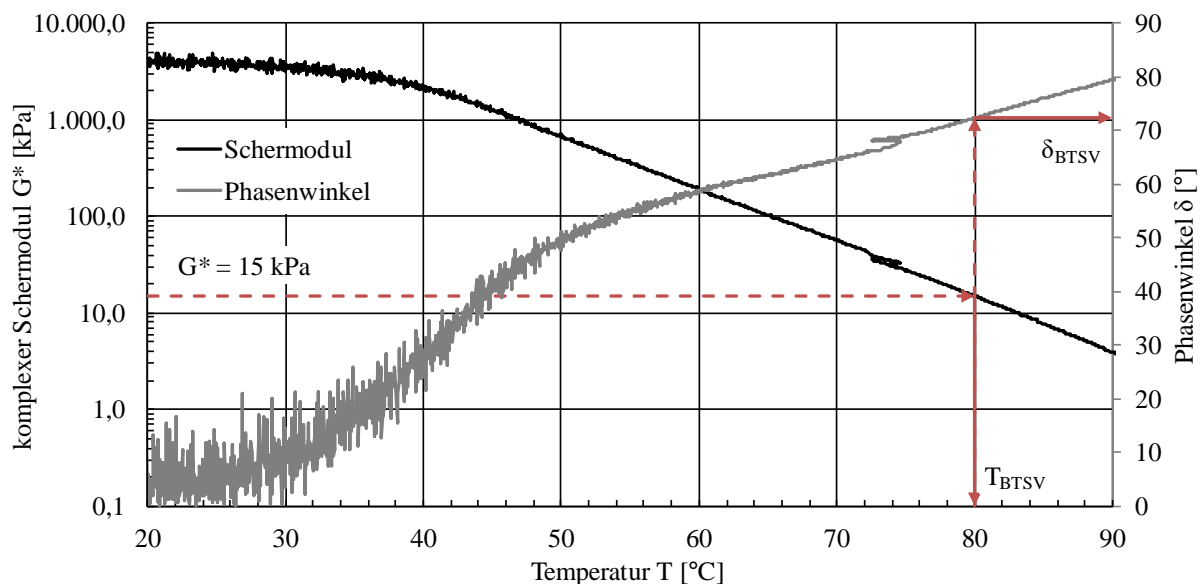


Abbildung 38. Beispielhafter Verlauf von Schermodul und Phasenwinkel einer Asphaltmörtelprobe bestimmt mittels dynamischen Scherrheometer im Temperaturbereich von 20 °C bis 90 °C.

4.2.2 Asphaltprüfungen

4.2.2.1 Ermüdungswiderstand mittels Zug-Schwellversuch

Die Gebrauchseigenschaft des Ermüdungswiderstands von Asphalt beschreibt den Widerstand gegen einen langsam voranschreitenden Schädigungsprozess durch Risse, der infolge wiederholter Belastung zu verringerter Steifigkeit und Festigkeit führt. Der Ermüdungswiderstand wurde an den Splittmastixasphalt-Varianten (Abschnitt 4.1.5.1, Tabelle 6) mittels Einaxialem Zug-Schwellversuch gem. DIN EN 12697-46 (DIN, 2012) bestimmt.

Beim Einaxialen Zug-Schwellversuch wird ein prismatischer Probekörper in Längsrichtung mit einer sinusförmigen Zugspannung kraftgeregt belastet. Die Zug-Schwellversuche wurden bei Prüftemperaturen von +5 °C und -10 °C durchgeführt. Als Unterspannung wird die im Abkühlversuch bei der Prüftemperatur des Zug-Schwellversuchs gemessene kryogene Spannung angesetzt.

Beim Abkühlversuch wird ein prismenförmiger Asphalt-Probekörper ausgehend von einer Starttemperatur von $T_0 = +20$ °C mit einer konstanten Temperaturrate von $\Delta T = -10$ K/h abgekühlt, während seine Länge durch die Regelung der Prüfmaschine konstant gehalten wird. Durch die verhinderte thermische Dehnung werden kryogene Zugspannungen im Asphalt-Probekörper induziert, die während des Abkühlversuchs aufgezeichnet werden. Die Ergebnisse der Abkühlprüfung sind die Bruchtemperatur T_F und die Bruchspannung $\sigma_{kry,F}$ bei Versagen des Asphalt-Probekörpers sowie der kryogene Zugspannungsverlauf $\sigma_{kry}(T)$ während des Abkühlvorgangs.

Die Unterspannung wurde mit einer sinusförmig schwellenden, mechanogenen Spannung von 1,6 MPa überlagert.

Die Probekörperabmessungen entsprachen den in Abschnitt 4.1.5.2 aufgeführten Werten. In einer Klebebank wurde jeder prismenförmige Probekörper an Stahladapter geklebt. Nach Aushärtung des Zweikomponentenklebers wurden die Probekörperabmessungen bestimmt und die Probekörper in die Prüfmaschine eingebaut. Der untere Adapter wurde mit der Grundplatte, der obere mit dem Prüfstempel verschraubt.

Vor Versuchsbeginn wurde der Probekörper spannungsfrei auf die Prüftemperatur T abgekühlt. Danach wurde die Zugkraft linear bis zum Erreichen der Unterspannung gesteigert und die durch Prüffrequenz f , Unterspannung σ_u und Oberspannung σ_o definierte Schwellbelastung setzte ein. In Abbildung 39 sind die Kenngrößen zusammengestellt, welche die sinusförmige Zug-Schwellspannung definieren.

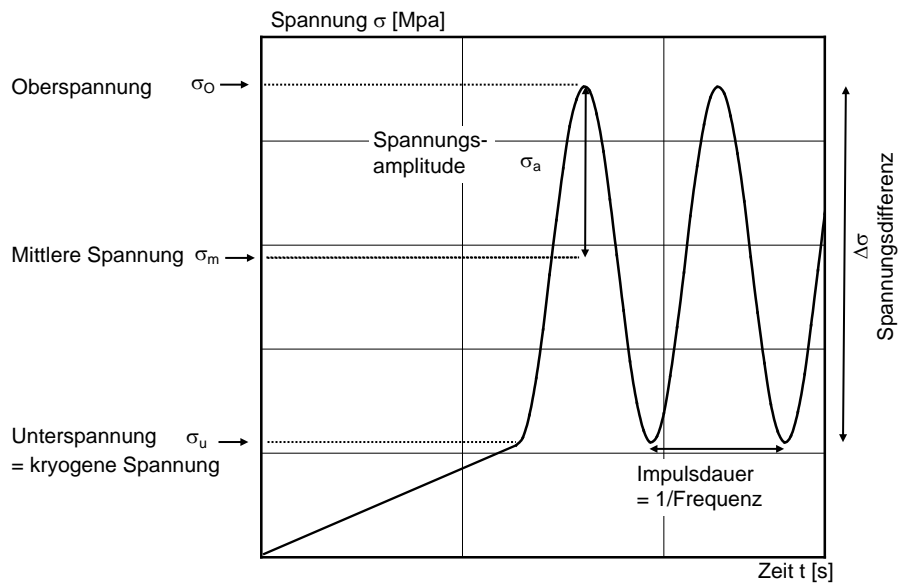


Abbildung 39. Kenngrößen der sinusförmigen Zug-Schwellbeanspruchung.

Während der gesamten Versuchsdauer werden die Signale der Kraft- und Wegmesseinrichtungen kontinuierlich erfasst. Zur Auswertung der Kraft- und Wegmessdaten werden die Parameter der Sinusfunktionen (Gl. 11 und Gl. 12) mittels Minimierung der Fehlerquadratsumme aus den 15 Messwerten einer einzelnen Schwingung ermittelt:

$$F(t) = F_m + F_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_F) \quad \text{Gl. 11}$$

mit:

$F(t)$: zeitabhängige, sinusförmige Kraftfunktion [N],

F_m : mittlere Kraft [N],

F_a : Kraftamplitude [N],

φ_F : Phasenverschiebung der Kraftschwingung [rad].

und

$$s(t) = s_m + s_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_s) \quad \text{Gl. 12}$$

mit:

$s(t)$: zeitabhängige, sinusförmige Wegfunktion [mm],

s_m : mittlerer Weg [mm],

s_a : Wegamplitude [mm],

φ_s : Phasenverschiebung der Wegschwingung [rad].

Die Versuchsbedingungen für die Zug-Schwellversuche gemäß gem. DIN EN 12697-46 (DIN, 2012) sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Versuchsbedingungen für die Triaxialversuche (gemäß DIN EN 13108-20)

Prüftemperatur	+5 °C und -10 °C
Dauer der Temperierung	75 Minuten (+5 °C), 120 Minuten (-10 °C)
Probekörperquerschnitt	40 x 40 mm
Probekörperhöhe	160 mm
zyklische Axialbelastung	sinusförmig
Frequenz der Axialbelastung	10 Hz
Unterspannung Axiallast	kryogene Spannung σ_{kry} bei +5 °C bzw. -10 °C
Oberspannung der Axiallast	$\sigma_{kry} + 1,6 \text{ MPa}$

Der Probekörper wurde bis zum Materialversagen belastet. Die Anzahl der Lastwechsel bei Bruchversagen wurde als das Ermüdungskriterium verwendet und wird im Folgenden als Bruchlastwechselzahl (N_{Bruch}) bezeichnet.

4.2.2.2 Verformungswiderstand mittels Triaxialversuch

Die Gebrauchseigenschaft der Verformungsbeständigkeit beschreibt den Widerstand des Asphalts gegen irreversible Verformungen infolge wiederholter Verkehrsbelastungen. Die Verformungsbeständigkeit wurde an den Asphaltbinderschicht-Varianten (Abschnitt 4.1.5.1, Tabelle 7) bestimmt. Dazu wurde der Triaxialversuch gemäß DIN EN 12697-25 (2013) angewendet.

Mittels Triaxialversuch wird jener Hauptspannungszustand simuliert, der in der Straße im Moment der Radüberfahrt entsteht (Abbildung 40). Bei der Radüberfahrt wird ein Volumenelement im Straßenoberbau in vertikaler Richtung mit einer Druckspannung beansprucht. Als Reaktion auf diese Belastung dehnt sich dieses Element in radialer Richtung aus. Durch umgebendes Material wird der betrachtete Volumenkörper allerdings an seiner Querdehnung behindert, wenn auch nicht gänzlich blockiert. Dadurch ergeben sich radiale Druckspannungen, die gemeinsam mit axialen Druckspannungen als Funktion beschrieben werden können.

Aus diesem Grund wird im Triaxialversuch ein zylindrischer Asphalt-Probekörper einem dreiachsigen (triaxialen) Spannungszustand ausgesetzt, der durch das Aufbringen eines zyklischen Axialdrucks und eines statischen Radialdrucks zur Behinderung der Querdehnung erzeugt wird.

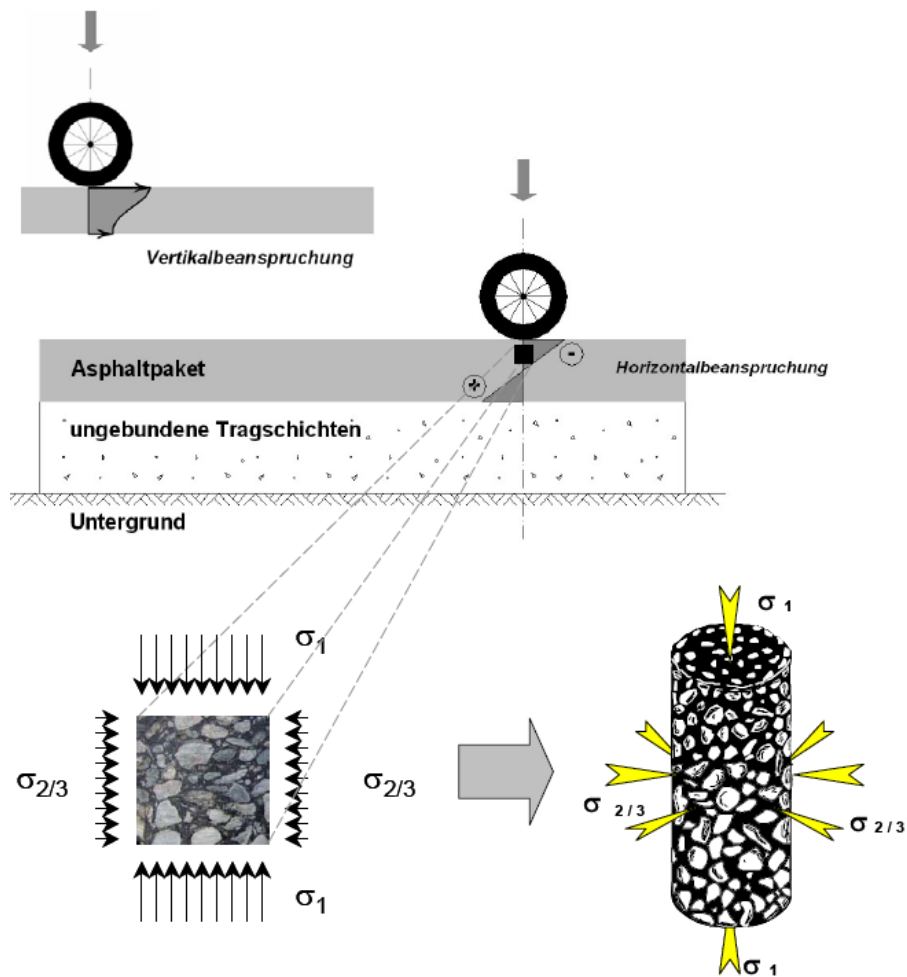


Abbildung 40. Räumlicher Spannungszustand in Asphaltbefestigungen und Übertragung auf den Triaxialversuch (Wellner, 2009).

Den triaxialen räumlichen Spannungszustand, dem der Probekörper während des dynamischen Triaxialversuchs ausgesetzt wird, zeigt Abbildung 41 schematisch. Werden alle Oberflächen mit der gleichen Druckspannung beansprucht, herrscht ein sogenannter hydrostatischer Spannungszustand. Die zusätzlich in axialer Richtung aufgebrachten Spannungen werden als deviatorischer Spannungsanteil bezeichnet und sind für die Entstehung bleibender Verformungen maßgebend.

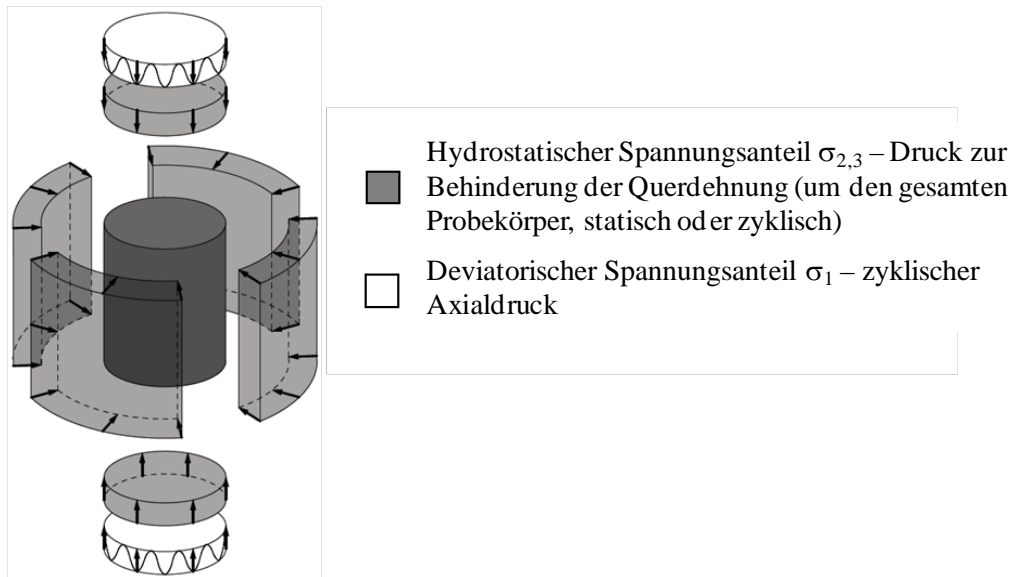


Abbildung 41. Schematische Darstellung des räumlichen Spannungszustandes beim Triaxialversuch (Ringleb, 2012).

Die Versuchsbedingungen für die Triaxialversuche gemäß DIN EN 13108-20 sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Die verwendete Triaxialzelle ist in Abbildung 42 dargestellt.

Tabelle 9: Versuchsbedingungen für die Triaxialversuche (gemäß DIN EN 13108-20)

Prüftemperatur	40 °C
Dauer der Temperierung	120 Minuten
Probekörperdurchmesser	100 mm
Probekörperhöhe	200 mm
Anzahl der Belastungszyklen	25000
zyklische Axialbelastung	sinusförmig
Frequenz der Axialbelastung	3 Hz
Amplitude der Axiallast	0,2 MPa
Behinderung der Querdehnung (konstanter radialer Druck)	0,050 MPa



Abbildung 42. Für die Triaxialversuche verwendeter Prüfeinsatz (ohne Mantelaufsatz).

Die fortlaufende sinusförmige axiale Belastung führt zu einer Stauchung des Probekörpers, der sich zeitgleich seitlich ausdehnt. Dadurch kommt es zu Akkumulation der in jedem Belastungszyklus entstandenen bleibenden Verformungen (Abbildung 43). Die axialen Verformungen werden kontinuierlich aufgenommen.

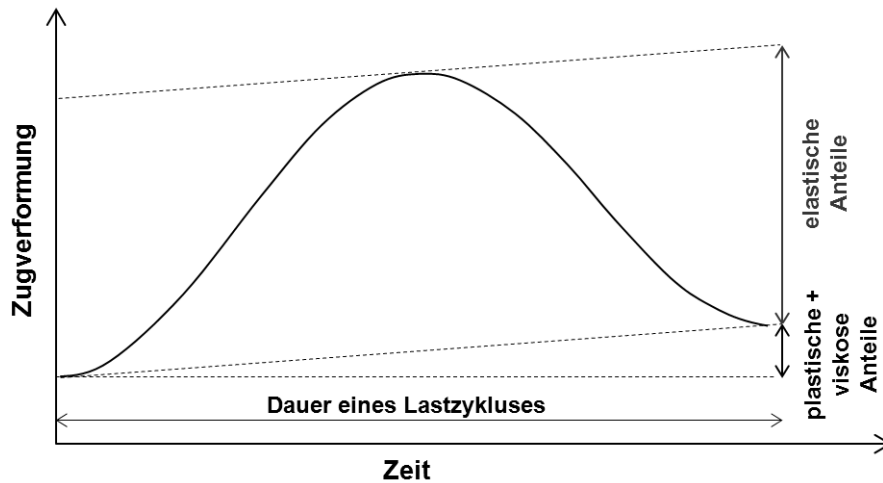


Abbildung 43. Elastische und bleibende (plastische und viskose) Verformungsanteile bei einem Lastzyklus im Triaxialversuch (schematisch).

Für jeden Lastzyklus kann die plastische Druckdehnung nach Gleichung 13 berechnet werden:

$$\varepsilon_{pd,i} = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 1000 \quad [\%] \quad \text{Gl. 13}$$

mit:

$\varepsilon_{pd,i}$: akkumulierte bleibende Dehnung nach dem i-ten Belastungszyklus [%],

h_0 : Höhe des Probekörpers am Anfang der Prüfung [mm],

h_i : Höhe des Probekörpers nach i Belastungszyklen [mm].

Die akkumulierten axialen plastischen Dehnungen als Funktion der Anzahl an Belastungszyklen bilden die Kriechkurve. Die Kriechkurve wird mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch die folgende Funktion beschrieben:

$$\varepsilon_{pd,n} = b \cdot n^a \quad [\%] \quad \text{Gl. 14}$$

mit:

$\varepsilon_{pd,n}$: akkumulierte bleibende Dehnung nach n Belastungszyklen [%],

a, b: Regressionsparameter [-],

n: Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Abbildung 44 zeigt eine typische Kriechkurve für verformungsbeständige Walzasphalte. Diese besteht aus 2 Phasen, wobei in der Phase I die Krümmung stark abnimmt. Phase II weist einen quasilinearen Kurvenverlauf auf. Der Anstieg der Kriechkurve (erste Ableitung) ergab die Dehnungsrate (Kriechrate), die als ein Maß für die Berücksichtigung der Beständigkeit des Mischgutes gegen bleibende Verformung interpretiert wird. Dies wird mittels der Methode der kleinsten Quadrate durch lineare Regression der Kriechkurve in der linearen Phase II

bestimmt (zwischen 5000 und 20000 Lastwechseln):

$$\varepsilon_{pd,n} = A_1 + B_1 \cdot n \quad [\%] \quad \text{Gl. 15}$$

mit:

$\varepsilon_{pd,n}$: plastische Druckdehnung nach n Belastungszyklen [%],

A_1, B_1 : Regressionsparameter [-],

n: Anzahl an erfolgten Belastungszyklen.

Anschließend wird die Kriechrate f_c im quasi-linearen Teil der Kriechkurve berechnet:

$$f_c = B_1 \cdot 10^4 \left[\frac{\mu\text{m/m}}{\text{Lastwechsel}} \right] \quad \text{Gl. 16}$$

mit:

B_1 : Regressionsparameter [-], siehe Gl. 15

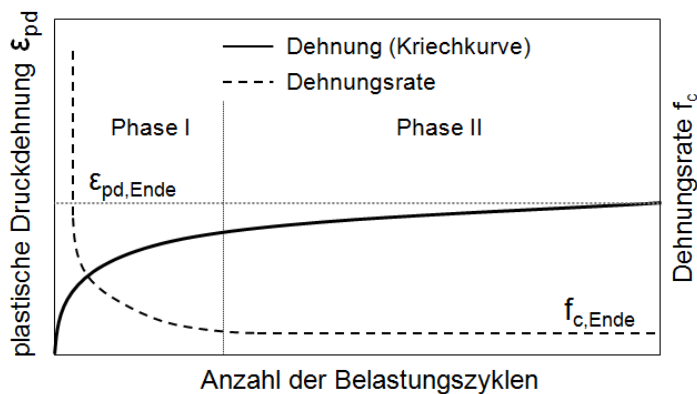


Abbildung 44. Verlauf der Kriechkurve und der Dehnungsrate bei einem Triaxialversuch für einen verformungsbeständigen Asphalt.

4.3 Strukturindizes mittels Bilderfassung und -analyse

4.3.1 Bilderfassung

Zur Digitalbilderfassung wurde ein handelsüblicher Flachbettscanner verwendet. Die Scans der jeweiligen Asphalt-Probekörper wurden mit einer Auflösung von einheitlich 600 dpi durchgeführt.

An den prismenförmigen Asphalt-Probekörpern für die Ansprache des Ermüdungswiderstands (jeweils 2 bis 3 Probekörper je Variante gem. Tabelle 6) wurde jeweils einer der beiden Längsschnitte digital erfasst (Abbildung 45).

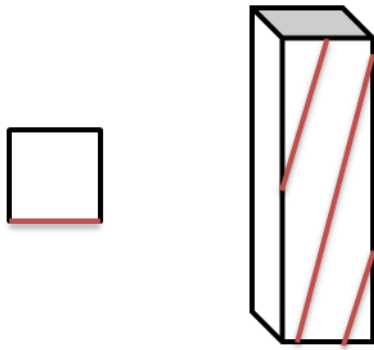


Abbildung 45. Mittels Flachbettscanner erfasster Längsschnitt (rot) an den prismenförmigen Asphalt-Probekörpern, Draufsicht (links), Seitenansicht (rechts)

An den zylindrischen Asphalt-Probekörpern für die Ansprache des Verformungswiderstandes (jeweils 2 bis 3 Probekörper je Variante gem. Tabelle 7) wurde die Mantelfläche digital erfasst, indem während des Scanvorgangs der Probekörper manuell mit gleichmäßiger Geschwindigkeit über die Scanneroberfläche abgerollt wurde. Auf diese Weise wurden nahezu verzerrungsfreie Digitalbilder der Mantelfläche gewonnen (Abbildung 46 und Abbildung 47).

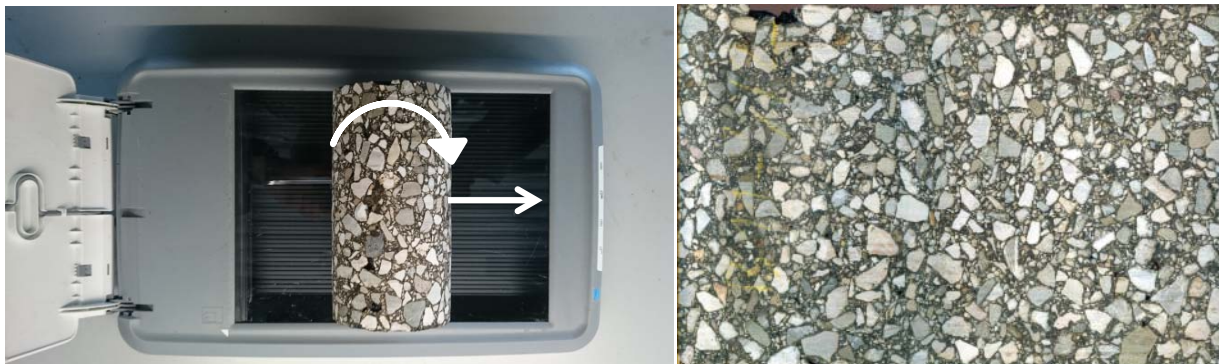


Abbildung 46. Einscannen der Mantelfläche des zylindrischen Asphalt-Probekörpers durch manuelles Abrollen (links), nahezu verzerrungsfreies Digitalbild als Ergebnis des Scanvorgangs (rechts).

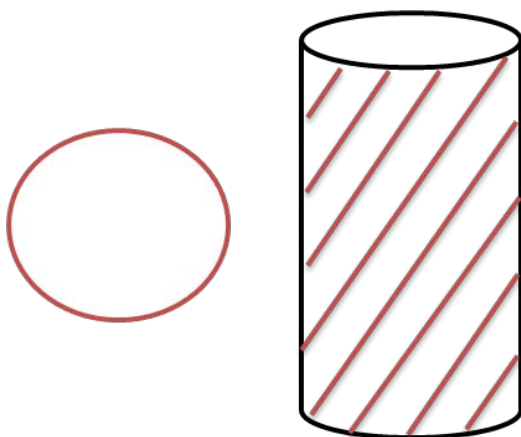


Abbildung 47. Mittels Flachbettscanner erfasste Mantelfläche (rot) an den zylindrischen Asphalt-Probekörpern, Draufsicht (links), Seitenansicht (rechts)

Die Bildverarbeitung und -analyse zur Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur wurde einheitlich mit der Software iPas² durchgeführt (Coenen et al., 2012). Zu den grundlegenden Funktionsweisen der im Rahmen der Bildanalyse verwendeten Filter und Algorithmen siehe Kap. 2.1.2 und Kap. 2.1.3.

Die mittels Flachbettscanner gewonnen Digitalbilder wurden zunächst in eine 8 Bit-Graustufenversion (256 Grauwerte) konvertiert. Ein Grauwert von 0 (schwarz) definiert einen Hohlraum, der maximale Grauwert von 255 (weiß) ein Gesteinskorn. Die Prozesskette der Teilprozesse der Bildverarbeitung zeigt Abbildung 48.

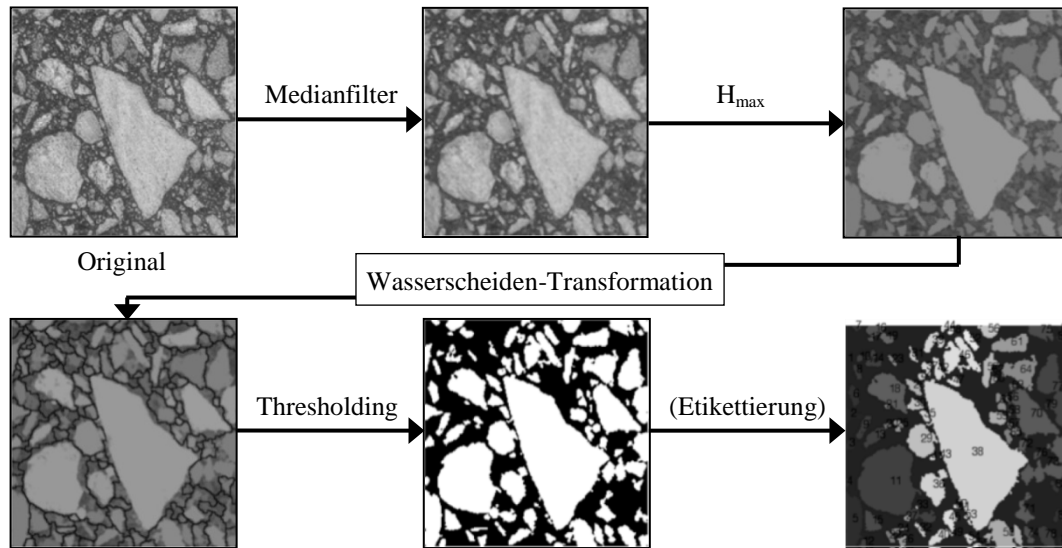


Abbildung 48. Ablauf der Digitalbildverarbeitung zur Charakterisierung der Asphaltstruktur (in Anlehnung an Coenen et al., 2012).

Mittels Medianfilter werden zunächst Ausreißer beziehungsweise Extremwerte, welche durch das „Salz & Pfeffer-Rauschen“ beziehungsweise durch Pixelfehler ausgelöst unterdrückt werden. Durch die H_{\max} -Transformation werden regionale Maximalwerte (Maxima) in Form der niedrigsten Grauwerte des Bereiches im Histogramm der Aufnahme festgelegt. So können unterschiedliche Pixelintensitäten innerhalb eines Gesteinskorns angeglichen werden, wodurch eine bessere Differenzierung der Bestandteile der inneren Asphaltstruktur ermöglicht wird. Mittels Wasserscheidenfilterung werden die Korngrenzen definiert und hervorgehoben, indem die jeweiligen Pixelwerte vom maximalen Grauwert von 255 abgezogen werden. Anschließend wird mittels Thresholding aus der 8 Bit-Graustufenversion ein Binärbild erzeugt, indem die Gesteinskörnung in weiß (255) und alle anderen Bestandteile wie Hohlräume, Bindemittel und Füller in schwarz (0) dargestellt werden.

Im abschließenden Bildverarbeitungsschritt werden den erkannten Gesteinskörnern ganze Zahlen zugeordnet, um diese eindeutig zu registrieren. Hierdurch lässt sich beispielsweise jedem Gesteinskorn die Orientierung eindeutig zuordnen.

4.3.2 Bildanalyse

Mittels der Bildanalyse wurden Strukturindizes zur (quantitativen) Beschreibung der inneren Asphaltstruktur gewonnen. Strukturindizes werden zum einen für die Gesamtstruktur und zum anderen für das Asphaltskelett bestimmt.

Das Asphaltskelett wird definiert als innere Gesteinsstruktur, über die hauptsächlich die Lastabtragung über Kraftketten erfolgt (Coenen et al., 2011, 2012). Nur zusammenhängende Gesteinskörner sind primär von Interesse; Gesteinskörner ohne jeglichen Kontaktpunkt sind ver-

nachlässigbar, da sie nicht zur Tragstruktur und damit zur Lastübertragung beitragen (Zhu et al., 2000). Wesentliche Strukturindizes sind die Anzahl an Kontaktpunkten (Kontaktzahl), die Kontaktlängen, die Kontaktorientierung sowie die Spannungspfade des Asphalt skeletts. Je größer die Kontaktzahl, umso besser ist die Spannungsverteilung und desto geringer die Spannungskonzentration (Abbildung 49).

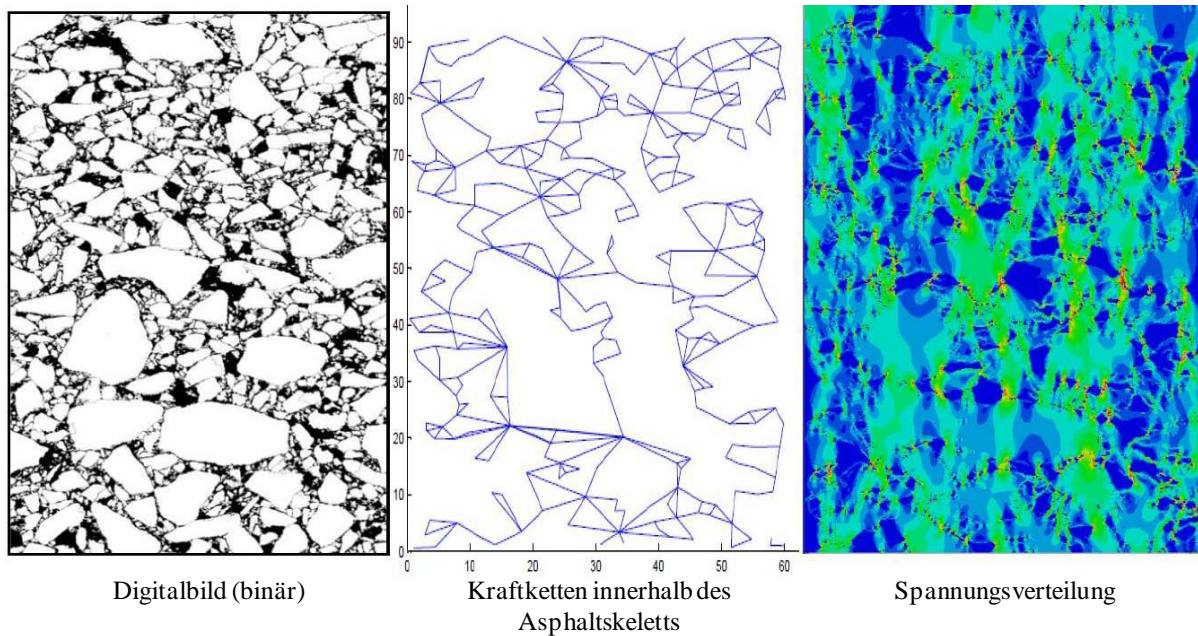


Abbildung 49. Zusammenhang zwischen Kraftketten und der Spannungsverteilung innerhalb des Asphalt skeletts (Roohi et al., 2012).

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die in Tabelle 10 aufgeführten Strukturindizes zur Charakterisierung der Gesamtstruktur (Index C) und des Asphalt skeletts (Index C,S) mittels Bildanalyse gewonnen, die nachfolgend näher erläutert werden.

Tabelle 10: Mittels Bildanalyse gewonnene Strukturindizes zur Charakterisierung der Gesamtstruktur (C) und des Asphalt skeletts (C,S)

Strukturindizes		
KP_C bzw. C,S	Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]	Kontaktbasierte Parameter
KL_C bzw. C,S	Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]	
AAA_C bzw. C,S	Durchschnittlicher Kontaktwinkel der Gesamtstruktur / des Skeletts [°]	
VM_C bzw. C,S	Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur / des Skeletts [-]	
ISI_C bzw. C,S	Interner Strukturindex der Gesamtstruktur / des Skeletts [mm/100 cm ²]	
Θ_C bzw. C,S	durchschnittlicher Hauptachsenwinkel der Gesteine der Gesamtstruktur / des Skeletts [°]	Gesteinsbasierte Parameter
Δ_C bzw. C,S	Vektormagnitude der Gesteine der Gesamtstruktur / des Skeletts [-]	

4.3.2.1 Anzahl der Gesteinskontakte KP_C bzw. C,S und Summe der Kontaktlängen KL_C bzw. C,S der Gesamtstruktur bzw. des Asphalt skeletts

Zur Identifizierung von Kontakten muss in der Analyse ein Schwellwert für den maximalen Abstand vorgegeben werden, ab dem ein Kontakt zwischen zwei Gesteinskörnern als solcher definiert wird. Der vorgegebene Abstandswert ("surface distance threshold" - SDT-Wert) definiert die Kontaktzone innerhalb der die Umrisspixel der beteiligten Gesteinskörner analysiert werden (Abbildung 50).

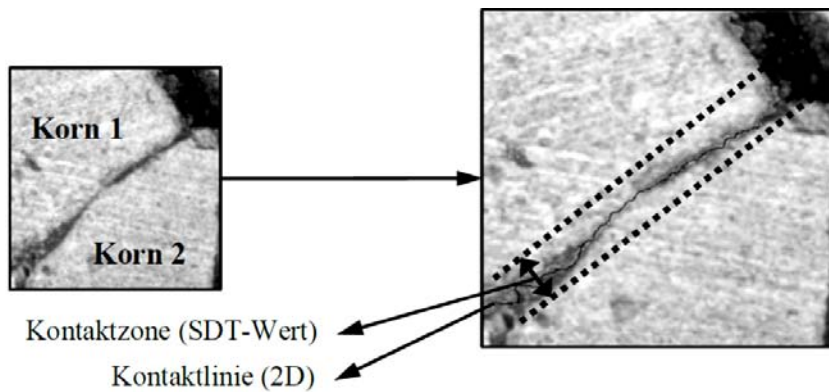


Abbildung 50. Definition einer Kontaktzone und Kontaktlinie zwischen zwei Gesteinskörnern zur Bestimmung von Kontaktpunkten und -längen innerhalb der Asphaltstruktur in Anlehnung an Roohi et al. (2012).

Die Umrisspixel zweier Gesteinskörner müssen sich innerhalb der Kontaktzone befinden und alle Umrisspixel beider Körner erfasst worden sein. Nur dann wird definitionsgemäß ein Kontakt identifiziert. Anhand dieser Pixel lässt sich die Kontaktlinie bestimmen, da für jeden Pixel des Korn 1 nur ein Pixel des Korn 2 zugehörig ist. Aus den Mittelpunkten der Pixelpärchen, im Folgenden Kontaktpixel genannt, ergibt sich die Kontaktlinie der beiden Körner (Abbildung 50). Weiterhin ist zur Bestimmung der Gesteinskontakte und -längen die Vorgabe einer minimalen Korngröße notwendig, die bei der Bildanalyse berücksichtigt werden soll. Je geringer die minimale Korngröße gewählt wird, desto zeitintensiver ist die Bildanalyse, da tendenziell mehr Kontaktpunkte und -längen identifiziert werden. Der Zeitaufwand für die Bildanalyse hängt in etwa linear von der vorgegebenen minimalen Korngröße zusammen, wonach beispielsweise die Analyse mit einer minimalen Korngröße von 0,1 mm die 10-fache Zeit im Vergleich zu einer Analyse mit einer minimalen Korngröße von 1 mm benötigt.

Auf Basis von Coenen et al. (2012) sowie von eigenen Voruntersuchungen (Wiskow, 2014 und 2015) sollte die minimale Korngröße mindestens das Vierfache des SDT-Wertes betragen. Dabei existiert ein Bereich der SDT-Werte (von ca. 0,10 bis ca. 0,75 mm), der nicht signifikant unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Anzahl an Kontaktpunkten liefert (siehe Abbildung 51).

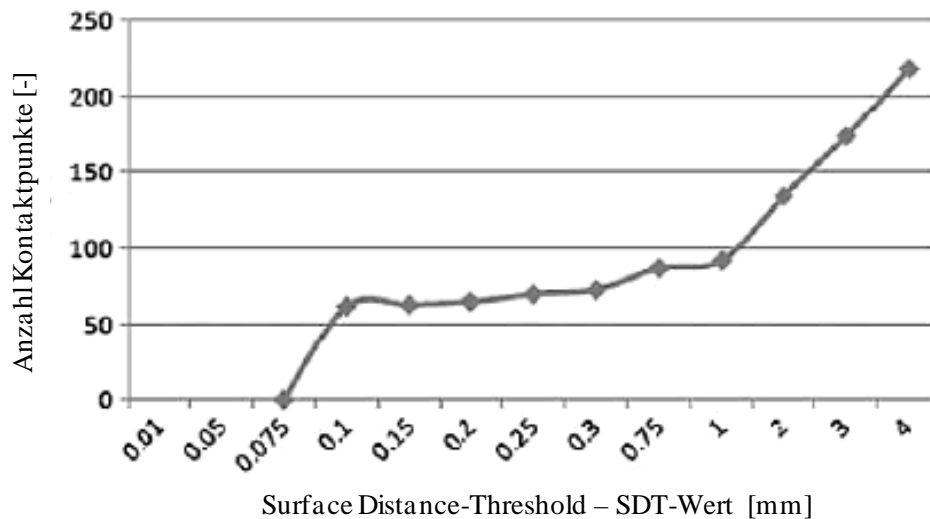


Abbildung 51. Anzahl der Kontaktpunkte in Abhängigkeit des gewählten Abstandswertes (SDT-Wert), Coenen et al. (2012).

In den Voruntersuchungen wurde die Anzahl an Kontaktpunkten an ausgewählten Varianten unter Variation des SDT-Wertes (0,2 bis 1,0 mm) bestimmt (Wiskow, 2014). Die Ergebnisse bestätigten den von Coenen et al. (2012) angeführten SDT-Bereich von 0,1 mm bis 0,75 mm, in dem sich die Anzahl an Kontaktpunkten nicht signifikant ändert.

Vor diesem Hintergrund wurden einheitlich für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bildanalysen folgende Eingangsgrößen vorgegeben:

- minimale Korngröße = 1 mm,
- Surface Distance Threshold (SDT-Wert) = 0,25 mm.

4.3.2.2 Durchschnittlicher Kontaktwinkel der Gesamtstruktur bzw. des Asphalt-skeletts AAA_C bzw. C,S

Die Kontaktpixel wurden algorithmusgestützt miteinander verbunden und zu jeder einzelnen Verbindungslinie die Senkrechte gebildet. Die Senkrechten aus jeder Kontaktzone wurden zu einem Vektor zusammengefasst, welcher letztlich die Kontaktorientierung dieser Kontaktzone darstellt (Abbildung 52). Die Kontaktorientierung, im Folgenden als Kontaktwinkel bezeichnet, beschreibt eine Winkelbeziehung der Kontaktorientierung von zwei Gesteinskörnern und der horizontalen Achse. Die zugrundeliegenden Algorithmen sind unter anderem in Coenen et al. (2012) dokumentiert.

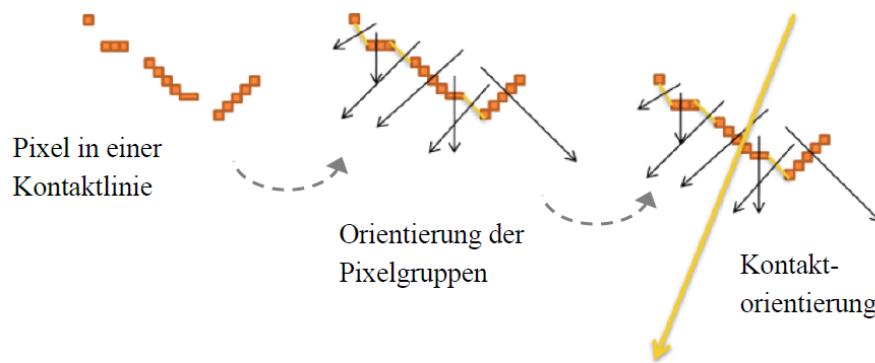


Abbildung 52. Vorgehensweise zur Bestimmung der Kontaktorientierung innerhalb der Asphaltstruktur in Anlehnung an Roohi et al. (2012).

4.3.2.3 Vektormagnitude (VM) und Internal Structure Index (ISI)

Basierend auf Roohi et al. (2012) wurde die durchschnittliche Anisotropie der Kontaktorientierungsverteilung mit der Vektormagnitude (VM) quantitativ beschrieben. Bei einer ideal einheitlichen Ausrichtung der Kontaktorientierung nimmt VM_C den Wert 1, bei einer vollständig ungleichmäßigen Kontaktorientierungsverteilung den Wert 0.

Um wesentliche Kontaktparameter in einem Wert zu vereinen und die Anzahl der statistisch relevanten unabhängigen Variablen zu verringern, wurde als zusätzlicher Strukturparameter der „Internal Structure Index“ (ISI) ermittelt. Dieser beschreibt die Summe der Widerstandskomponenten in Lastrichtung und damit die Effektivität sowie die Verzahnung der Gesteinskörner. Die Vektormagnitude (VM) und der Internal Structure Index (ISI) wurden wie folgt berechnet:

$$VM = \frac{1}{M} \sqrt{(\sum_{i=1}^M \cos 2\theta_i)^2 + (\sum_{i=1}^M \sin 2\theta_i)^2} \quad [-] \quad \text{Gl. 17}$$

$$ISI = \sum_{i=1}^M \text{Kontaktlänge}_i \cdot \sin(AAA_i) \quad [\text{mm}/100 \text{ cm}^2] \quad \text{Gl. 18}$$

mit:

θ_i : einzelne Kontaktorientierung $[\circ]$,

M: Anzahl an Kontakten $[-]$,

Kontaktlänge_i : Kontaktlänge von Kontakt i [mm],

AAA_i: Kontaktorientierung von Kontakt i $[\circ]$.

4.3.2.4 Durchschnittlicher Hauptachsenwinkel (θ) und Vektormagnitude (Δ)

Um Strukturindizes bezüglich der Gesteinsorientierung zu gewinnen, wurde zunächst der Hauptachsenwinkel für jedes Gesteinskorn (θ_k) bestimmt (Gl. 19 in Verbindung mit Gl. 20). Dieser ist durch die Winkelbeziehung zwischen der Hauptachse jedes einzelnen Gesteinskorns und der horizontalen Achse definiert. Dabei steht die Hauptachse für die längste Strecke innerhalb eines Gesteinskorns (Abbildung 53).

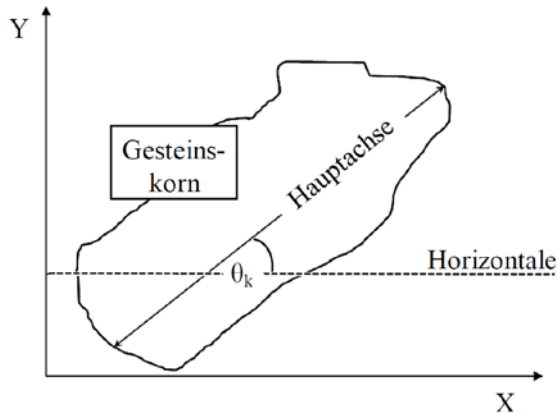


Abbildung 53. Definition des Hauptachsenwinkels zur Bestimmung von Strukturindizes bezüglich der Kornorientierung.

$$\theta_k = \cos^{-1} \left(\frac{x_i - x_{-i}}{D_{\max}} \right) [^\circ] \quad \text{Gl. 19}$$

mit:

θ_k : Hauptachsenwinkel eines Gesteinskorns [$^\circ$],

D_{\max} : Hauptachse eines Gesteinskorns [mm],

x_i : X-Koordinate eines Oberflächenpixels [-],

x_{-i} : X-Koordinate eines Oberflächenpixels auf der entgegengesetzten Seite einer Strecke, die durch den Schwerpunkt des Gesteinskorns verläuft [-],

und

$$D_{\max} = \max(\sqrt{(x_i - x_{-i})^2 + (y_i - y_{-i})^2}) [\text{mm}] \quad \text{Gl. 20}$$

mit:

D_{\max} : Hauptachse eines Gesteinskorns [mm],

x_i : X-Koordinate eines Oberflächenpixels [-],

y_i : Y-Koordinate eines Oberflächenpixels [-],

x_{-i} : X-Koordinate eines Oberflächenpixels auf der entgegengesetzten Seite einer Strecke, die durch den Schwerpunkt des Gesteinskorns verläuft [-],

y_{-i} : Y-Koordinate eines Oberflächenpixels auf der entgegengesetzten Seite einer Strecke, die durch den Schwerpunkt des Gesteinskorns verläuft [-].

Nach Ermittlung aller Hauptachsenwinkel wurde ein Gesteinsorientierungswert stellvertretend für die Einzelausrichtungen berechnet. Dieser wird als Vektormagnitude (Δ) bezeichnet, und kann Werte [-] im Bereich Null bis Eins annehmen. Für eine vollkommene Zufallsausrichtung der Gesteinskörner steht der Wert Null, für eine exakt gleiche Ausrichtung steht hingegen der Wert Eins. Desweiteren wurde der durchschnittliche Hauptachsenwinkel (θ), aus dem Mittelwert der Hauptachsenwinkel der einzelnen Gesteinskörner (θ_k , Gl. 19) berechnet, welcher für einen einfachen Mittelwert steht (Gl. 22). Vektormagnitude (Δ) und durchschnittliche Hauptachsenwinkel (θ) bestimmen sich über:

$$\Delta = \frac{100}{N} \sqrt{(\sum \sin 2\theta_k)^2 + (\sum \cos 2\theta_k)^2} \quad [-] \quad \text{Gl. 21}$$

$$\theta = \frac{\sum |\theta_k|}{N} \quad [^\circ] \quad \text{Gl. 22}$$

mit:

N: Anzahl der Gesteinskörner [-],

θ_k : Hauptachsenwinkel des einzelnen Gesteinskorns [$^\circ$], vergleiche Gl. 19.

5 Untersuchungsergebnisse und Interpretation

In dieser Arbeit wird die Notwendigkeit zur Bestimmung von strukturbeschreibenden Parametern mit der formulierten These begründet, dass das Gebrauchsverhalten von Asphalt nicht ausreichend durch die volumetrischen Asphalteigenschaften allein, sondern durch die „innere Struktur“ maßgeblich mitbestimmt wird. Folglich ist zu erwarten, dass nur bedingt systematische Zusammenhänge zwischen volumetrischen Kenngrößen eines Asphalt-Probekörpers und dessen Gebrauchsverhalten vorliegen. Weiterhin ist auch nicht zu erwarten, dass zwischen den volumetrischen Kenngrößen und der inneren Asphaltstruktur, die mit den entwickelten Strukturindizes charakterisiert wird, systematische Zusammenhänge bestehen.

Um diese Vermutung zu untersuchen, werden im Folgenden die Zusammenhänge zwischen ausgewählten volumetrischen Kenngrößen, einem Strukturindex und dem resultierenden Gebrauchsverhalten betrachtet. Um eine gewisse Spreizung bei den volumetrischen Kenngrößen zu erhalten, werden Ergebnisse von Varianten eines Splittmastixasphalts SMA 11 S aufgeführt.

5.1 Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und volumetrischen Kenngrößen

In Abbildung 54 ist der Zusammenhang zwischen den volumetrischen Kenngrößen Raumdichte und Hohlraumgehalt und der Bruchlastwechselzahl aus dem Zug-Schwellversuch dargestellt.

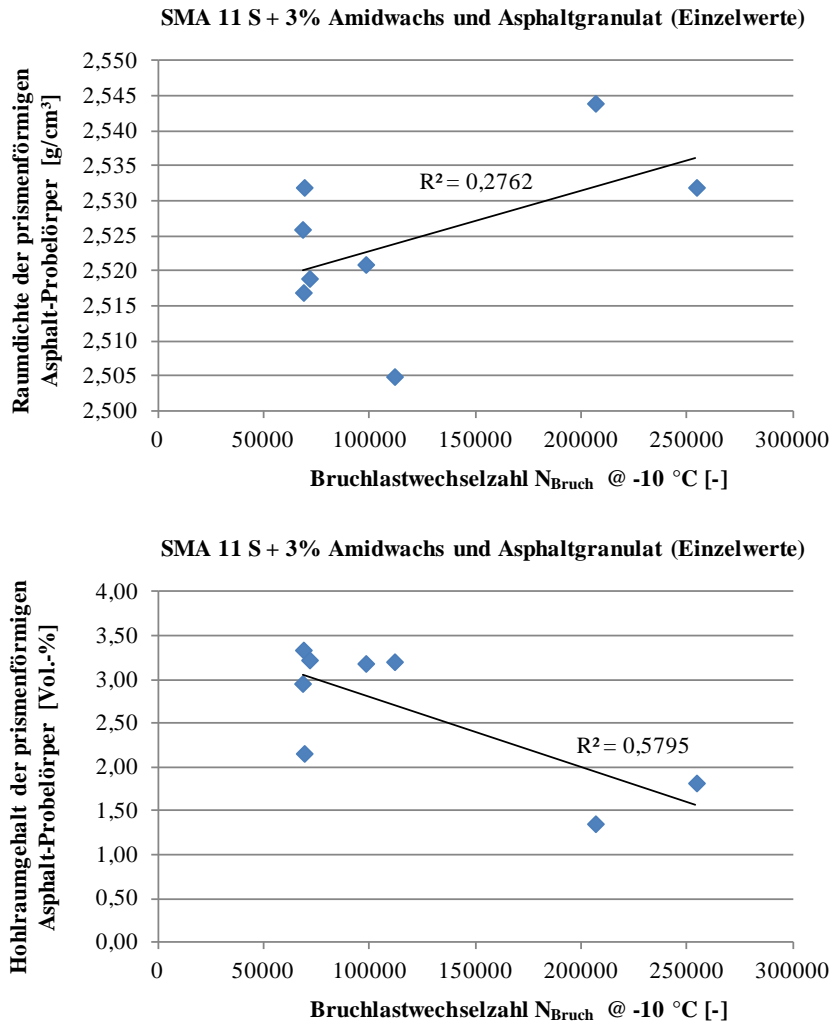


Abbildung 54. Zusammenhang zwischen den volumetrischen Kenngrößen Raumdicke (oben) und Hohlraumgehalt (unten) von Asphalt-Probekörpern und deren Ermüdungswiderstand bestimmt mittels Bruchlastwechselzahl aus dem Zug-Schwellversuch.

Es wird nur ein schwacher Zusammenhang zwischen der Raumdicke der Asphalt-Probekörper und der Bruchlastwechselzahl festgestellt. Tendenziell werden mit zunehmender Raumdicke höhere Bruchlastwechselzahlen erreicht (Abbildung 54, oben). Die Betrachtung des Hohlraumgehalts liefert einen mäßigen Zusammenhang mit der Bruchlastwechselzahl. Mit sinkendem Hohlraumgehalt ergeben sich höhere Bruchlastwechselzahlen und damit ein besserer Ermüdungswiderstand (Abbildung 54, unten). Das bedeutet, dass in diesem Fall die Raumdicke und Hohlraumgehalt nur bedingt geeignet sind, um eine Prognose des resultierenden Ermüdungswiderstands zu ermöglichen. Für die gleichen Asphalt-Probekörper wurden Strukturindizes mittels Bildanalyse bestimmt (vgl. Abschnitt 4.3) und den entsprechenden Raumdichten und Hohlraumgehalten gegenübergestellt. Abbildung 55 zeigt den Zusammenhang zwischen den volumetrischen Kenngrößen der Asphalt-Probekörper und deren Anzahl der Gesteinskontakte des Asphaltskeletts.

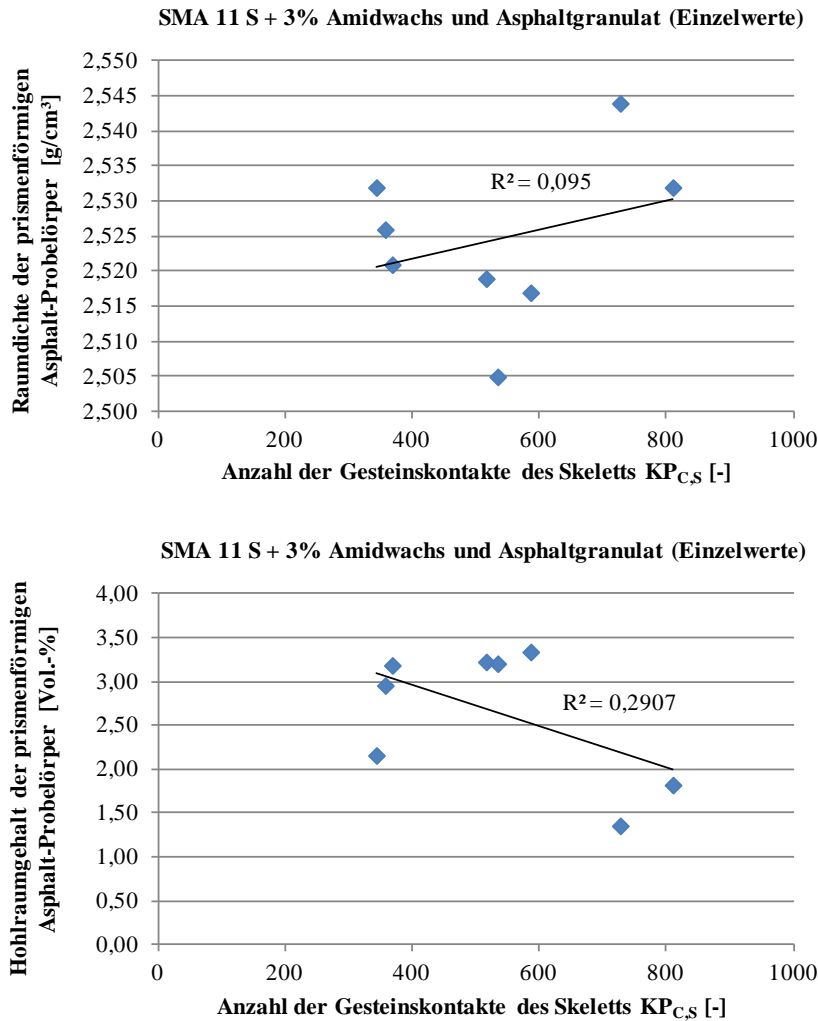


Abbildung 55. Zusammenhang zwischen den volumetrischen Kenngrößen Raumdichte (oben) und Hohlraumgehalt (unten) von Asphalt-Probekörpern und deren Anzahl der Gesteinskontakte des Asphaltskeletts bestimmt mittels Bildanalyse.

Es wird deutlich, dass weder die Raumdichte (Abbildung 55, oben) noch der Hohlraumgehalt (Abbildung 55, unten) mit der Anzahl an Gesteinskontakten in einem klaren Zusammenhang stehen. Das bedeutet, dass die Anzahl der Gesteinskontakte einen Parameter (Strukturindex) darstellt, der zusätzlich zu den volumetrischen Kenngrößen zur Charakterisierung der lastabtragenden inneren Asphaltstruktur beiträgt. Entscheidend ist nun, ob dieser Strukturindex im Vergleich zu den volumetrischen Kenngrößen besser geeignet ist, um das Ermüdungsverhalten zu prognostizieren. Hierzu ist in Abbildung 56 der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Gesteinskontakte im Asphalt-Probekörper und dessen Bruchlastwechselzahl im Zug-Schwellversuch dargestellt.

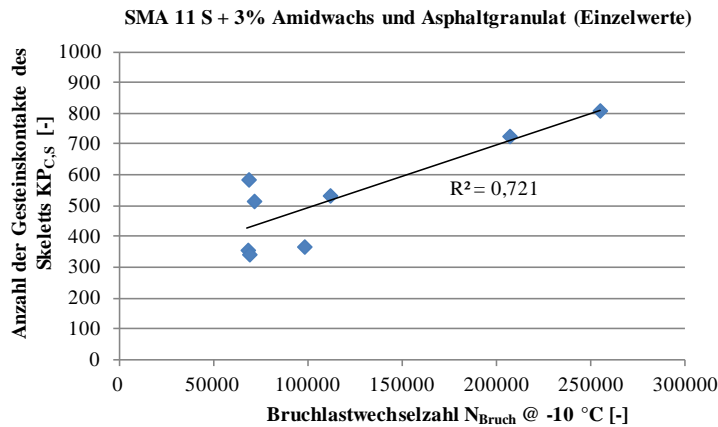


Abbildung 56. Zusammenhang zwischen der Anzahl der Gesteinskontakte im Asphalt-Probekörper und dessen Ermüdungswiderstand bestimmt mittels Bruchlastwechselzahl aus dem Zug-Schwellversuch.

Der eindeutige Zusammenhang zwischen der Anzahl der Gesteinskontakte im Asphalt-Probekörper und der Bruchlastwechselzahl deutet darauf hin, dass ein derartiger Strukturindex neben den volumetrischen Kenngrößen zusätzliche Informationen zur Struktur liefert, die eine bessere Prognose der Gebrauchseigenschaften – hier des Ermüdungswiderstands – ermöglicht. Es ist plausibel, dass eine höhere Anzahl an Gesteinskontakten zu einer besseren mechanischen Verzahnung und in der Folge zu einer besseren lastabtragende Wirkung, resultierend in einer höheren Bruchlastwechselzahl führt. Im folgenden Abschnitt 5.2 wird im Detail auf den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Strukturindizes und dem Ermüdungswiderstand eingegangen.

5.2 Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und Ermüdungswiderstand

Um den Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und Ermüdungswiderstand zu analysieren, wurden zunächst die im Abschnitt 4.3 erläuterten Strukturindizes für jeden Asphalt-Probekörper mittels Bildanalyse bestimmt. Im Anschluss wurde der Ermüdungswiderstand der einzelnen Asphalt-Probekörper mittels Zug-Schwellversuch (vgl. Abschnitt 4.2.2.1) prüftechnisch angesprochen.

Im Rahmen einer statistischen Analyse zum Zusammenhang der inneren Asphaltstruktur und Ermüdungswiderstand erscheint es nicht zielführend, unterschiedliche Regressionstypen in die Untersuchungen mit einzubeziehen, da beispielsweise durch die Annahme eines exponentiellen oder polynomischen Zusammenhangs der Parameter möglicherweise höhere Korrelationen nachgewiesen werden können, dies jedoch als realitätsfern bezüglich des Materialverhaltens angesehen werden muss (Wiskow, 2015).

Daher konzentriert sich die nachfolgende statistische Betrachtung ausschließlich auf die Untersuchung von linearen Zusammenhängen der Parameter (lineare Regression).

Die Korrelationen wurden sowohl nach Pearsons Korrelationskoeffizienten als auch nach Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten ermittelt und auf Signifikanz überprüft. Die Vorgehensweise hierzu ist im Anhang 8 (a) beschrieben.

Tabelle 11 zeigt die Einordnung der Korrelationswerte als Bewertungsmaßstab im Rahmen der statistischen Analyse.

Tabelle 11: Einordnung der Korrelationswerte als Bewertungsmaßstab der statistischen Analyse des Zusammenhangs zwischen Strukturindizes und Ermüdungswiderstand des Asphalts

Bewertungsmaßstab				
Korrelationswerte		Signifikanz		
0	Keine Korrelation	$\leq ,01$ (1 %)	**	Hoch signifikant
0 bis 0,2	Sehr schwache Korrelation	$\leq ,05$ (5 %)	*	signifikant
0,2 bis 0,4	Schwache Korrelation	$> ,05$ (5 %)	ns	Nicht signifikant
0,4 bis 0,6	Mittlere Korrelation	P	Sign. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman	
0,6 bis 0,8	Starke Korrelation	P-S	Sign. nach Pearson, jedoch nicht nach Spearman	
0,8 bis 1,0	Sehr starke Korrelation	-P+S	Keine Sign. nach Pearson, jedoch nach Spearman	
1,0	Perfekte Korrelation			

Diejenigen signifikanten Werte von Pearson, die nach Spearman keine Signifikanz besitzen, werden mit „P-S“ markiert. Diejenigen Werte, die nach Spearman im Gegensatz zu Pearson Signifikanz besitzen, werden mit „-P+S“ gekennzeichnet, und diejenigen, die einen eindeutig höheren Wert besitzen, werden mit „P++S“ kenntlich gemacht.

Grundsätzlich wurde die Signifikanz der Korrelation zu einem Niveau von 5 % überprüft. Dies beschreibt die maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit, also das fälschliche Ablehnen der Nullhypothese. Hoch signifikante Korrelationen weisen eine Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1\%$, signifikante Korrelationen eine Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$ auf. Korrelationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit über 5% werden als nicht signifikant eingestuft.

Für die statistische Analyse wurden Stichprobeneingrenzungen vorgenommen (siehe Tabelle 12), da die Überlagerung verschiedener Effekte (Prüftemperatur, Wachsmodifizierung, Asphaltgranulatzugabemenge) nicht zielführend für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen innerer Asphaltstruktur und Ermüdungswiderstand ist.

Tabelle 12: Bezeichnungen der Stichprobeneingrenzungen zur statistischen Analyse des Zusammenhangs zwischen Strukturindizes und Ermüdungswiderstand des Asphalts

Variantebezeichnung	Bedeutung / Stichprobenumfang
5 °C	Prüftemperatur 5 °C
-10 °C	Prüftemperatur -10 °C
oW	Keine Zugabe von Wachs
FT	Zugabe von FT-Wachs
Am	Zugabe von Amid-Wachs
0 %	0 % Zugabe von Asphaltgranulat
20 %	20 % Zugabe von Asphaltgranulat
40 %	40 % Zugabe von Asphaltgranulat

Die Stichproben wurden anhand der Prüftemperaturen, der Wachsmodifizierung und der Zugabemenge von Asphaltgranulat unterschieden (Tabelle 12).

In den folgenden Diagrammen wird sowohl das Bestimmtheitsmaß R^2 , sowie der in den jeweiligen Tabellen angegebene, zugehörige Korrelationskoeffizient r angegeben. Der Zusammenhang zwischen R^2 und r ergibt sich aus Gl. 23:

$$r = \sqrt{R^2}$$

Gl. 23

5.2.1 Korrelationen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

5.2.1.1 Ermüdungswiderstand bei 5 °C

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der statistischen Analyse zum Zusammenhang der Bruchlastwechselzahl bei 5 °C und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte dargestellt.

Tabelle 13: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,430**	mittel	N _{Bruch}	ISI _{C,S}	5 °C	P
2	0,427**			KL _{C,S}	5 °C	P
3	0,423**			ISI _C	5 °C	P
4	0,420**			KL _C	5 °C	P
5	0,365*	schwach		VM _{C,S}	5 °C	P
6	0,361*			VM _C	5 °C	P
7	0,346*			KP _{C,S}	5 °C	P
8	0,324*			KP _C	5 °C	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Zunächst ist festzustellen, dass die Strukturindizes des Asphaltskeletts ($KP_{C,S}$, $KL_{C,S}$, $ISI_{C,S}$ und $VM_{C,S}$) im Vergleich zu den entsprechenden Strukturindizes der Gesamtstruktur (KP_C , KL_C , ISI_C und VM_C) durchweg stärkere Korrelation mit der Bruchlastwechselzahl aufweisen. Die Kontaktlängen (KL_C , $KL_{C,S}$) und die internen Strukturindizes (ISI_C , $ISI_{C,S}$) weisen mittlere, aber hoch signifikante Korrelationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5 % auf mit der Bruchlastwechselzahl bei 5 °C auf (Abbildung 57). Dagegen zeigen die Kontaktpunkte (KP_C , $KP_{C,S}$) sowie die Vektormagnituden (VM_C , $VM_{C,S}$) nur eine schwache, signifikante Korrelation mit der Bruchlastwechselzahl (Tabelle 13).

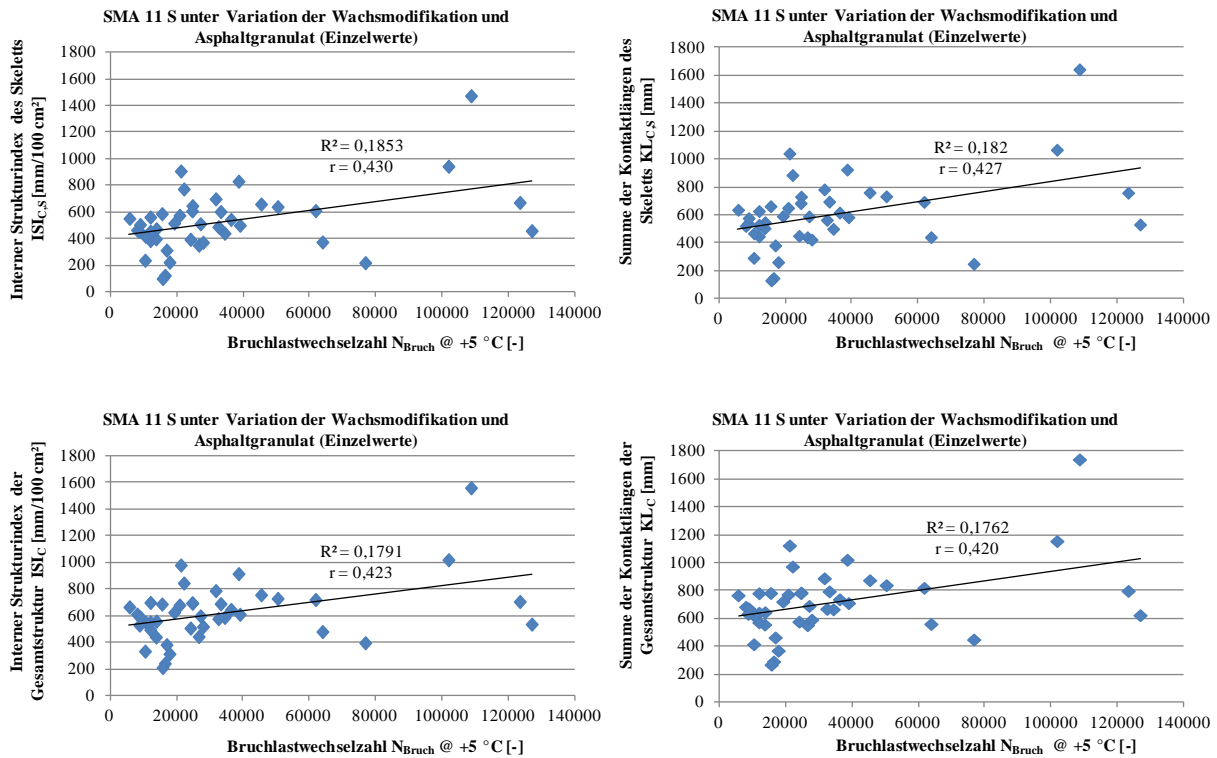


Abbildung 57. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C.

Die festgestellten Zusammenhänge zwischen Strukturindex und Bruchlastwechselzahl sind positiv, wonach steigende Werte des Strukturindex mit höheren Bruchlastwechselzahlen korrelieren. Dies ist vor dem theoretischen Hintergrund plausibel. Hohe Werte für die Summe an Kontaktlängen oder die Summe der Widerstandskomponenten in Lastrichtung (ISI) deuten darauf hin, dass eine gute mechanische Verzahnung und Verkantung des Gesteinsgerüsts vorliegt, resultierend in einer entsprechend hohen lastabtragenden Wirkung.

Werden statt der Einzelwerte die für die jeweilige SMA 11 S-Variante gebildeten Mittelwerte der Bruchlast und der Strukturindizes gegenübergestellt, so wird ein deutlich höheres Korrelationsniveau festgestellt (Tabelle 14). Die vier stärksten Korrelationen sind in Abbildung 58 dargestellt.

Tabelle 14: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,633**	stark	N _{Bruch}	ISI _C	5 °C	P-S
2	0,632**			KL _C	5 °C	P-S
3	0,616**			ISI _{C,S}	5 °C	P-S
4	0,614**			KL _{C,S}	5 °C	P-S
5	0,508*	mittel		KP _{C,S}	5 °C	P-S
6	0,486*			KP _C	5 °C	P-S
7	0,482*			VM _{C,S}	5 °C	-P+S
8	0,286*	schwach		VM _C	5 °C	P-S

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P-S = Signifikanz nach Pearson, jedoch nicht nach Spearman

-P+S = Keine Signifikanz nach Pearson, jedoch nach Spearman

$KP_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

$KL_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

$VM_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

$ISI_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

In der Rangliste der stark ausgeprägten Korrelationen mit der Bruchlastwechselzahl finden sich zu gleichen Teilen Strukturindizes des Asphaltskeletts ($ISI_{C,S}$, $KL_{C,S}$) und Strukturindizes der Gesamtstruktur (ISI_C und KL_C). Insgesamt bestätigen die anhand der Mittelwerte identifizierten Zusammenhänge zwischen Strukturindizes und Bruchlastwechselzahl die Ergebnisse unter Einbeziehung der Einzelwerte.

Sowohl die Kontaktlängen wie auch die internen Strukturindizes (ISI) weisen stark ausgeprägte Korrelationen mit der Bruchlastwechselzahl auf (Abbildung 58). Desweiteren sind diese Korrelationen als hoch signifikant einzustufen. Mittel ausgeprägte Korrelationen werden für die Kontaktpunkte und die Vektormagnitude mit der Bruchlastwechselzahl identifiziert.

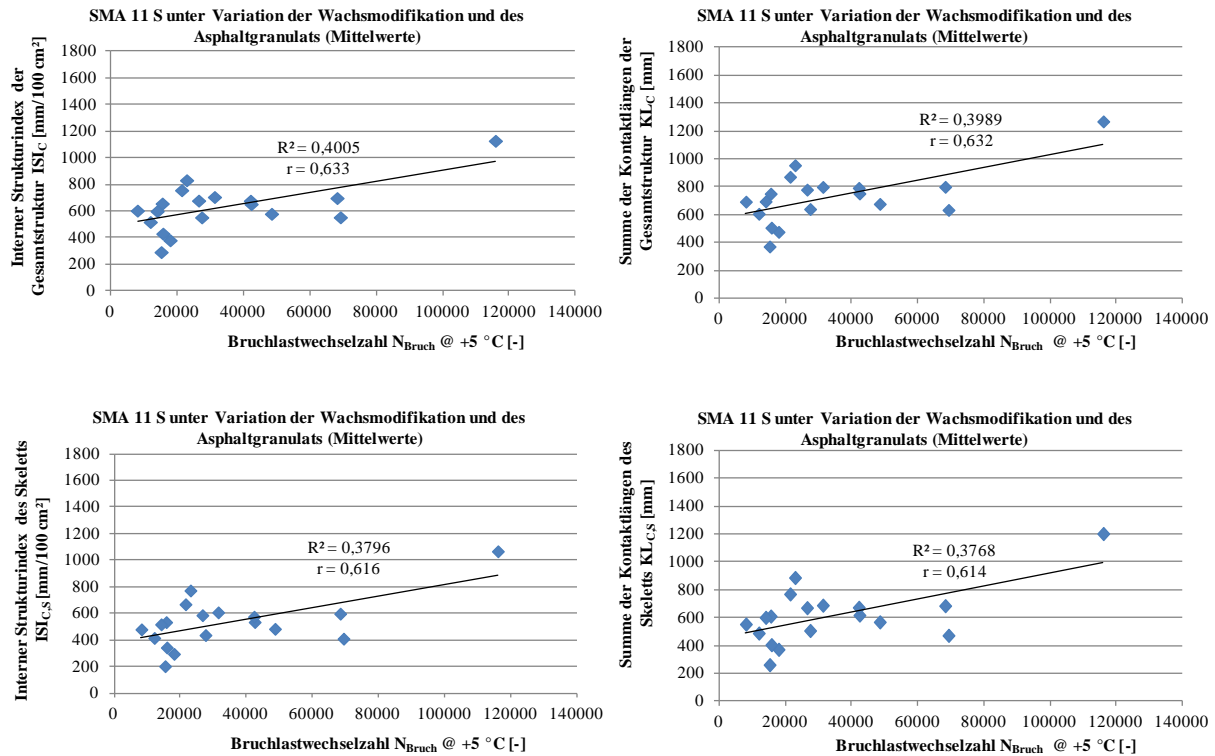


Abbildung 58. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C.

Stichprobeneingrenzung hinsichtlich Wachsmodifikation

Erfolgt eine Stichprobeneingrenzung hinsichtlich der Wachsmodifikation, kann der Einfluss der Strukturindizes auf die Bruchlastwechselzahl getrennt nach Wachstyp (ohne Wachs, mit Amidwachs, mit FT-Wachs) beurteilt werden.

Eindeutige Zusammenhänge praktisch aller Strukturindizes mit der Bruchlastwechselzahl werden für die SMA-Varianten mit Amidwachs identifiziert (Tabelle 15). In Abbildung 59 sind die vier stärksten Korrelationen dargestellt.

Tabelle 15: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Wachsmodifikation

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,943**	sehr stark	N_{Bruch}	ISI _C	5 °C; Am	P
2	0,942**			KL _C	5 °C; Am	P
3	0,937**			ISI _{C,S}	5 °C; Am	P
4	0,935**			KL _{C,S}	5 °C; Am	P
5	0,892**			KP _{C,S}	5 °C; Am	P
6	0,888**			KP _C	5 °C; Am	P
7	0,859**			VM _C	5 °C; Am	P
8	0,763**	stark		VM _{C,S}	5 °C; Am	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_{C bzw. C,S} = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_{C bzw. C,S} = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_{C bzw. C,S} = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_{C bzw. C,S} = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Bis auf die Vektormagnitude des Asphaltskeletts (VM_{C,S}) zeigen alle Strukturparameter eine sehr starke Korrelation mit der Bruchlastwechselzahl auf einem hoch signifikanten Niveau. Die festgestellten Zusammenhänge sind positiv, das bedeutet mit steigendem Wert des Strukturindex wird eine entsprechend höhere Bruchlastwechsel erreicht.

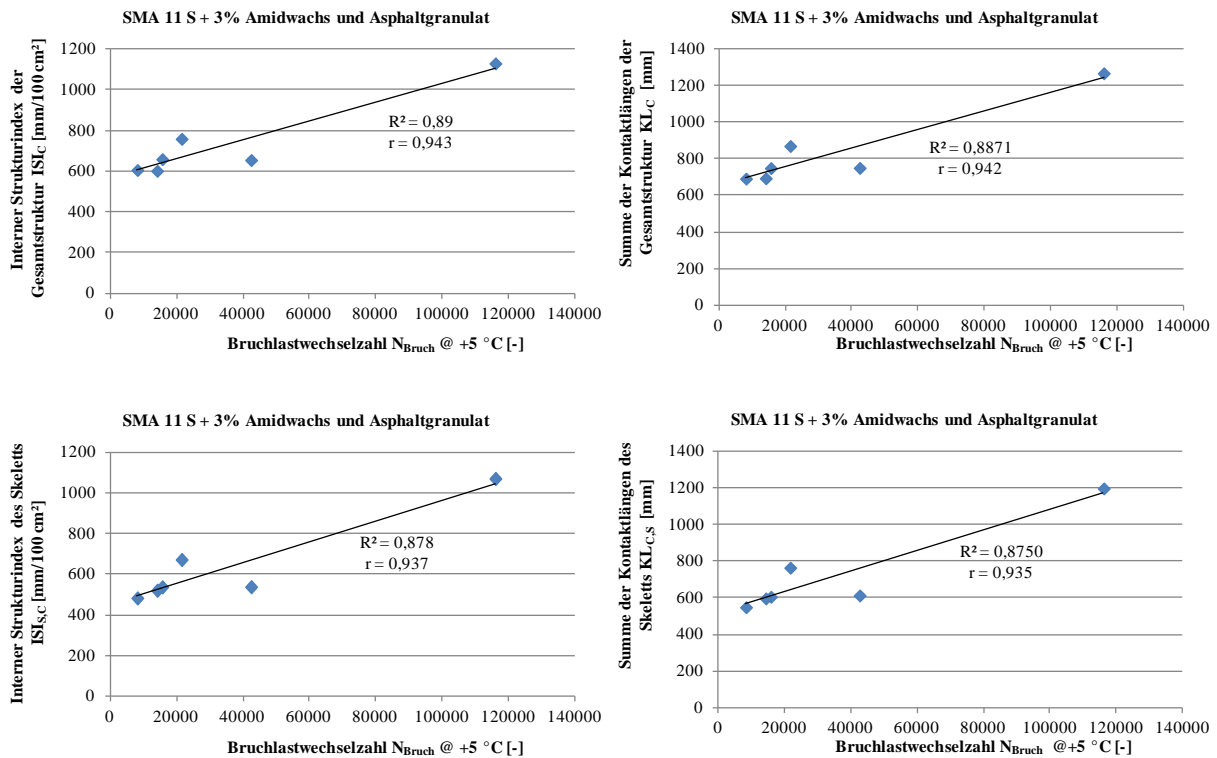


Abbildung 59. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Wachsmodifikation.

Für die SMA-Varianten ohne Wachs und unter Zugabe von FT-Wachs konnten dagegen keine eindeutigen Korrelationen zwischen Strukturindizes und Bruchlastwechsel festgestellt werden. Welche Effekte hierfür ursächlich sind, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden.

Stichprobeneingrenzung hinsichtlich Zugabemenge des Asphaltgranulats

Erfolgt eine Stichprobeneingrenzung hinsichtlich der Zugabemenge des Asphaltgranulats, kann der Einfluss der Strukturindizes auf die Bruchlastwechselzahl getrennt nach der Zugabemenge (ohne Asphaltgranulat, 20 M.-% und 40 M.-% Asphaltgranulat) beurteilt werden.

Eindeutige Zusammenhänge praktisch aller Strukturindizes mit der Bruchlastwechselzahl werden für die SMA-Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat festgestellt (Tabelle 16). Abbildung 60 zeigt die vier stärksten Korrelationen.

Tabelle 16: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Granulatzugabemenge

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,805**	stark	N_{Bruch}	$VM_{C,S}$	5 °C; 40%	P
2	0,770**			VM_C	5 °C; 40%	P
3	0,768**			ISI_C	5 °C; 40%	P
4	0,767**			KL_C	5 °C; 40%	P
5	0,752**			$KL_{C,S}$	5 °C; 40%	P
6	0,741**			$ISI_{C,S}$	5 °C; 40%	P
7	0,729**			KP_C	5 °C; 40%	P
8	0,726**			$KP_{C,S}$	5 °C; 40%	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Die Korrelationswerte der Strukturindizes mit der Bruchlastwechselzahl liegen in einem engen Bereich zwischen 0,726 und 0,805 und sind hoch signifikant. Eine Differenzierung zwischen Strukturindizes der Gesamtstruktur und des Asphaltskeletts bezüglich des Zusammenhangs mit der Bruchlastwechselzahl ist nicht eindeutig möglich.

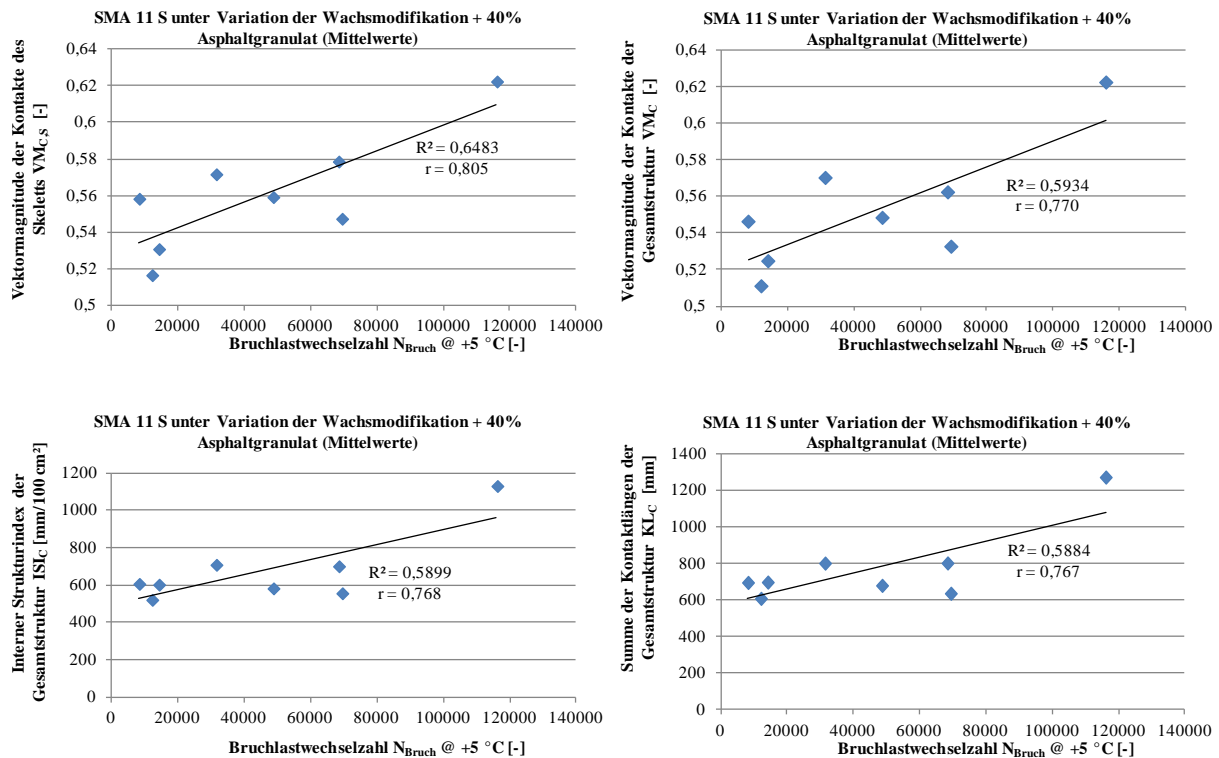


Abbildung 60. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Granulatzugabemenge.

Die stärksten Korrelationswerte für die SMA-Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat werden für die Vektormagnitude der Gesamtstruktur (0,805) und des Asphaltskeletts (0,770) erreicht. Mit steigender Vektormagnitude wird eine höhere Bruchlastwechselzahl erreicht. Die Vektormagnitude repräsentiert die Anisotropie der Kontaktorientierung, bei einem Wert von 0 liegt eine vollkommen ungleiche Kontaktorientierung, bei einem Wert von 1 liegt eine vollkommen einheitliche Kontaktorientierung vor. Vor diesem Hintergrund ist der festgestellte positive Zusammenhang zwischen Vektormagnitude und Bruchlastwechselzahl plausibel. Umso einheitlicher die Kontaktorientierung, desto widerstandsfähiger ist die innere Asphaltstruktur gegenüber der Lasteinwirkung.

Für die SMA-Varianten ohne Asphaltgranulat beziehungsweise mit 20 M.-% Asphaltgranulat konnten dagegen keine eindeutigen Korrelationen zwischen Strukturindizes und Bruchlastwechselzahl bei 5 °C festgestellt werden.

5.2.1.2 Ermüdungswiderstand bei -10 °C

Analog zur statistischen Analyse zum Zusammenhang des Ermüdungswiderstands bei 5 °C mit den Strukturindizes (Abschnitt 5.2.1.1) werden zunächst Einzelwerte betrachtet.

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der statistischen Analyse zum Zusammenhang der Bruchlastwechselzahl bei 5 °C und der Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte dargestellt.

Tabelle 17: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,513**	mittel	N _{Bruch}	KL _{C,S}	-10 °C	P
2	0,509**			ISI _{C,S}	-10 °C	P
3	0,493**			KP _{C,S}	-10 °C	P-S
4	0,468**			KL _C	-10 °C	P-S
5	0,463**			ISI _C	-10 °C	P-S
6	0,442**			KP _C	-10 °C	P-S
7	0,373*	schwach		VM _{C,S}	-10 °C	P-S
8	0,245*			VM _C	-10 °C	P-S

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1\%$

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

P-S = Signifikanz nach Pearson, jedoch nicht nach Spearman

$KP_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

$KL_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

$VM_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

$ISI_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Analog zu den Ergebnissen bei der Prüftemperatur $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vgl. Tabelle 13) zeigen die Strukturindizes des Asphaltskeletts ($KP_{C,S}$, $KL_{C,S}$, $ISI_{C,S}$ und $VM_{C,S}$) im Vergleich zu den entsprechenden Strukturindizes der Gesamtstruktur (KP_C , KL_C , ISI_C und VM_C) höhere, positive Korrelationen mit der Bruchlastwechselzahl. Bis auf die Vektormagnitude des Asphaltskeletts $VM_{C,S}$ werden mittel ausgeprägte Korrelationen zwischen den Strukturindizes und der Bruchlastwechselzahl bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ identifiziert. Die Korrelationen sind zudem hoch signifikant. Die größten Korrelationswerte weisen die Summe der Kontaktlänge des Asphaltskeletts $KL_{C,S}$ (0,513) und der interne Strukturindex $ISI_{C,S}$ mit 0,509 auf (Abbildung 61).

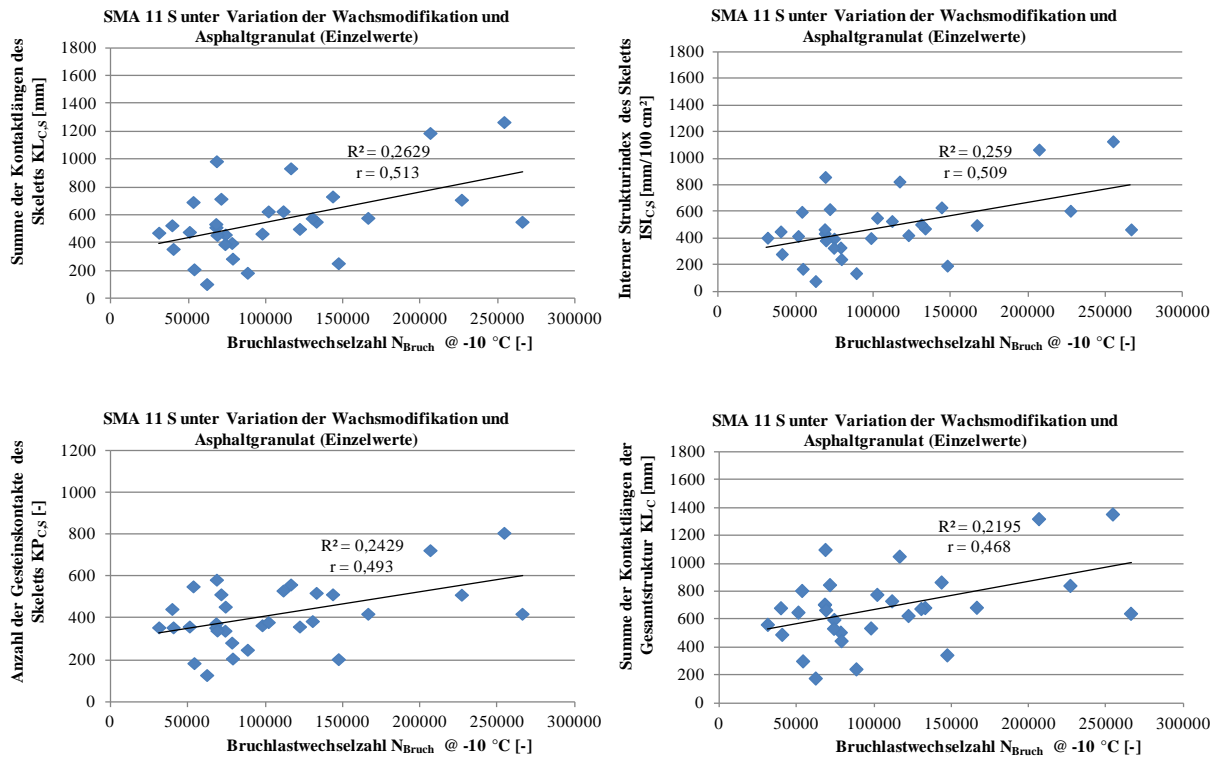


Abbildung 61. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur -10 °C.

Analog zu den Ergebnissen bei +5 °C ergeben sich positive Zusammenhänge zwischen Strukturindex und Bruchlastwechselzahl, wonach steigende Werte des Strukturindex mit höheren Bruchlastwechselzahlen korrelieren.

Bei Betrachtung der Mittelwerte der Bruchlast und der Strukturindizes der jeweilige SMA 11 S-Variante wird ein im Vergleich zu den Einzelwerten leicht höheres Korrelationsniveau festgestellt, welches jedoch mit einer höheren Irrtumswahrscheinlichkeit (< 5%) behaftet ist (Tabelle 18 und Abbildung 62).

Tabelle 18: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur -10 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,601*	stark	N_{Bruch}	$KL_{C,S}$	-10 °C	P-S
2	0,594*			$ISI_{C,S}$	-10 °C	P-S
3	0,578*			$KP_{C,S}$	-10 °C	P-S
4	0,557*			KL_C	-10 °C	P-S
5	0,549*			ISI_C	-10 °C	P-S
6	0,534*			$VM_{C,S}$	-10 °C	-P+S

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P-S = Signifikanz nach Pearson, jedoch nicht nach Spearman

-P+S = Keine Signifikanz nach Pearson, jedoch nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Insgesamt bestätigen die anhand der Mittelwerte identifizierten Zusammenhänge zwischen Strukturindizes und Bruchlastwechselzahl die Ergebnisse unter Einbeziehung der Einzelwerte. Die Strukturindizes des Asphaltskeletts weisen im Vergleich zu den entsprechenden Strukturindizes der Gesamtstruktur höhere Korrelationswerte mit der Bruchlastwechselzahl auf. Unter den vier stärksten Korrelationen mit der Bruchlastwechselzahl sind drei Strukturindizes des Asphaltskeletts vertreten (Tabelle 18 und Abbildung 62).

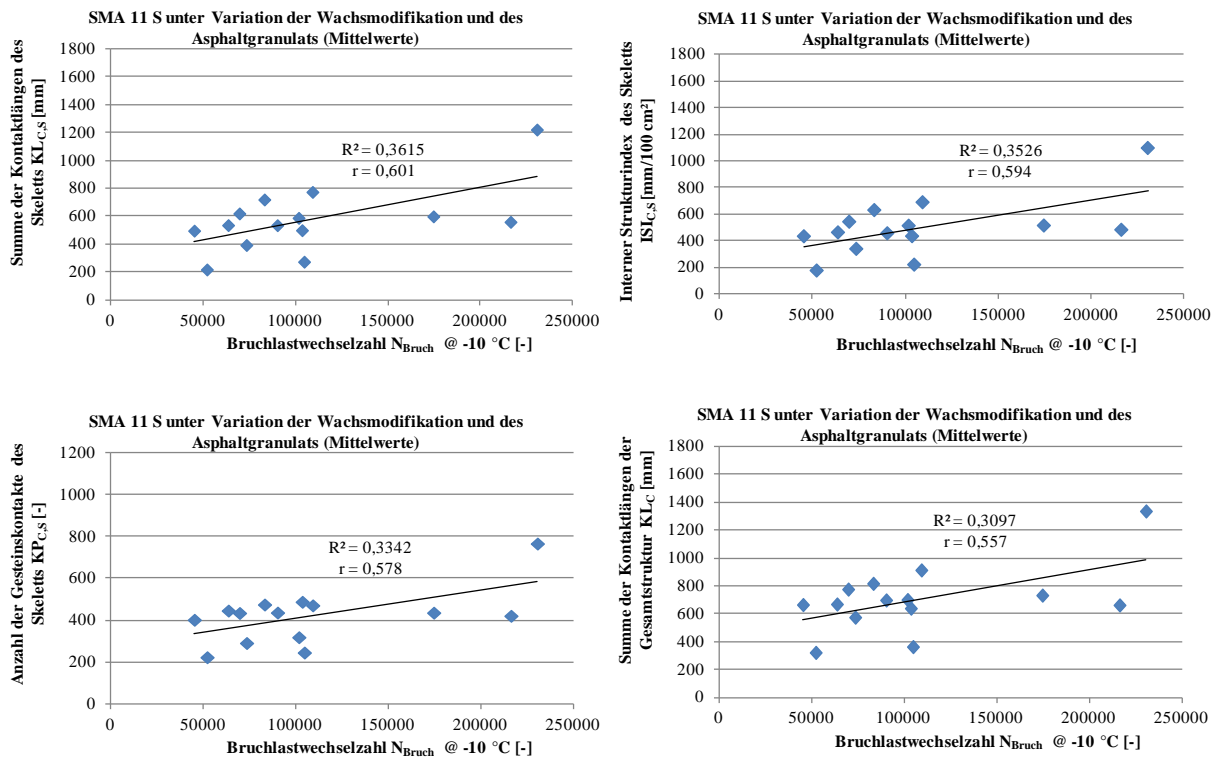


Abbildung 62. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur -10 °C .

5.2.2 Korrelationen in Abhängigkeit von der Art der Wachsmodifikation

Die Korrelation zwischen Bruchlastwechselzahl und Strukturindex wird getrennt vom Einfluss der Wachsmodifikation durch eine entsprechende Stichprobeneingrenzung untersucht.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen für die Prüftemperatur 5 °C werden bestätigt. Eindeutige Zusammenhänge praktisch aller Strukturindizes mit der Bruchlastwechselzahl werden für die SMA-Varianten mit Amidwachs identifiziert (Tabelle 19). Abbildung 63 zeigt die vier stärksten Korrelationen.

Tabelle 19: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur -10 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Wachsmodifikation

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,990**	sehr stark	N_{Bruch}	KP_C	-10 °C; Am	P
2	0,990**			$KP_{C,S}$	-10 °C; Am	P
3	0,970**			KL_C	-10 °C; Am	P
4	0,966**			ISI_C	-10 °C; Am	P
5	0,955**			$KL_{C,S}$	-10 °C; Am	P
6	0,953**			$ISI_{C,S}$	-10 °C; Am	P
7	0,942**			$VM_{C,S}$	-10 °C; Am	P
8	0,915**			VM_C	-10 °C; Am	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Alle Strukturindizes der SMA-Varianten mit Amidwachs weisen eine sehr starke Korrelation mit der Bruchlastwechselzahl auf einem hoch signifikanten Niveau auf. Eine klare Differenzierung der Strukturindizes hinsichtlich der Güte der Korrelation ist daher nicht möglich.

Die festgestellten Zusammenhänge sind positiv, das bedeutet mit steigendem Wert des Strukturindex wird eine entsprechend höhere Bruchlastwechselzahl erreicht.

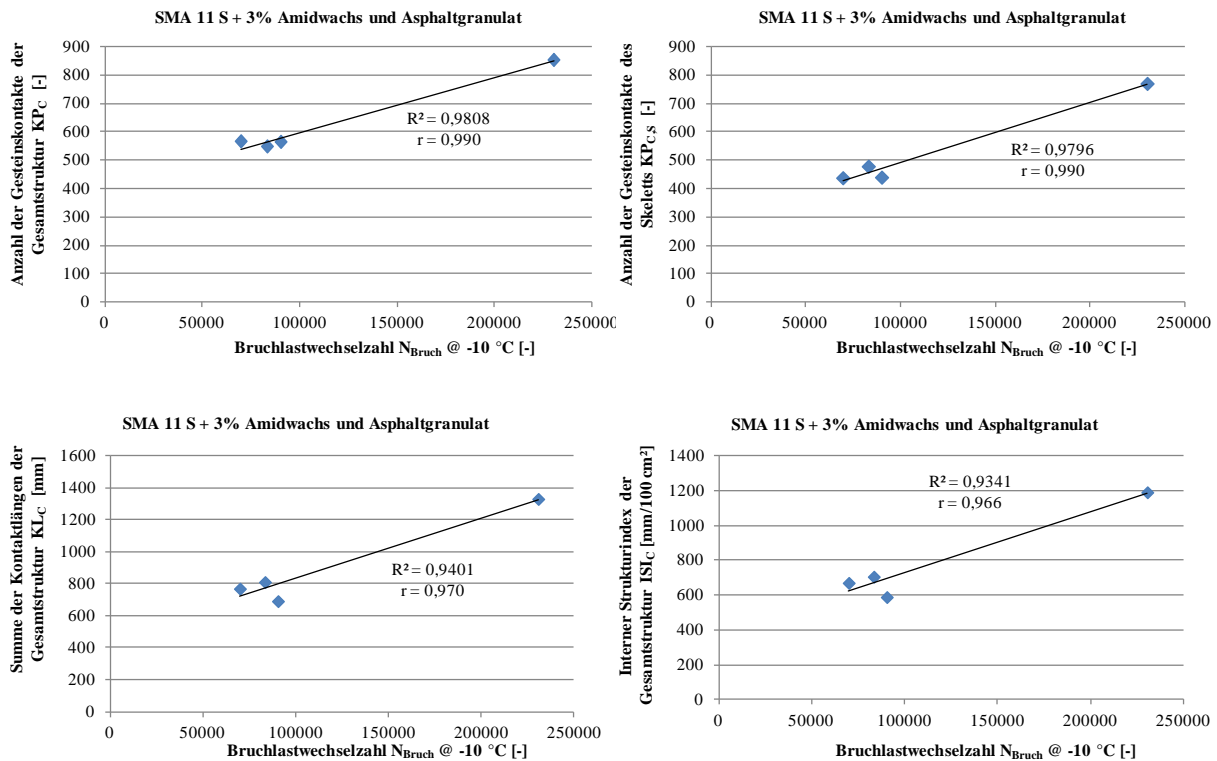


Abbildung 63. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur -10 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Wachsmodifikation.

Insgesamt bestätigen sich die guten Korrelationen der Amidwachs-Varianten mit der Bruchlastwechselzahl bei 5 °C auch für die Bruchlastwechselzahl bei -10 °C. Da für die Zug-Schwellprüfungen bei -10 °C weniger Asphalt-Probekörper zur Verfügung standen, basieren die Ergebnisse der statistischen Analyse für die Varianten bei -10 °C im Vergleich zu den Varianten bei 5 °C auf einem geringeren Stichprobenumfang. Dies wird bei der abschließenden Bewertung der festgestellten Korrelationen entsprechend berücksichtigt.

5.2.3 Korrelationen in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Asphaltgranulats

Um die Korrelation zwischen Bruchlastwechselzahl und Strukturindex getrennt vom Einfluss der Zugabemenge des Asphaltgranulats zu untersuchen, wird die Stichprobe entsprechend eingegrenzt. Es werden jeweils getrennt die Varianten ohne Asphaltgranulat, mit 20 M.-% und 40 M.-% Asphaltgranulat analysiert.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen für die Prüftemperatur 5 °C werden bestätigt. Für die SMA-Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat werden mittel bis stark ausgeprägte Zusammenhänge zwischen den Strukturindizes und der Bruchlastwechselzahl identifiziert (Tabelle 20). In Abbildung 64 sind die vier stärksten Korrelationen zusammengestellt.

Tabelle 20: Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur -10 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Granulatzugabemenge

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,639**	stark	N _{Bruch}	KP _{C,S}	-10 °C; 40%	P
2	0,630**			KL _{C,S}	-10 °C; 40%	P
3	0,622**			ISI _{C,S}	-10 °C; 40%	P
4	0,564*	mittel		KL _C	-10 °C; 40%	P
5	0,563*			KP _C	-10 °C; 40%	P
6	0,557*			ISI _C	-10 °C; 40%	P
7	0,541*			VM _{C,S}	-10 °C; 40%	P
8	0,536*			VM _C	-10 °C; 40%	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Die Korrelationen der Strukturindizes des Asphalt skeletts sind mit Ausnahme der Vektormagnitude im Vergleich zu den Strukturindizes der Gesamtstruktur mit Werten zwischen 0,622 und 0,639 stark ausgeprägt. Die übrigen Strukturindizes weisen mittel ausgeprägte Korrelationen zur Bruchlastwechselzahl im Wertebereich 0,536 bis 0,564 mit einem Signifikanzniveau von 95% auf. Es werden ausschließlich positive Korrelationen (höherer Wert bei Strukturindex führt zu höherer Bruchlastwechselzahl) festgestellt.

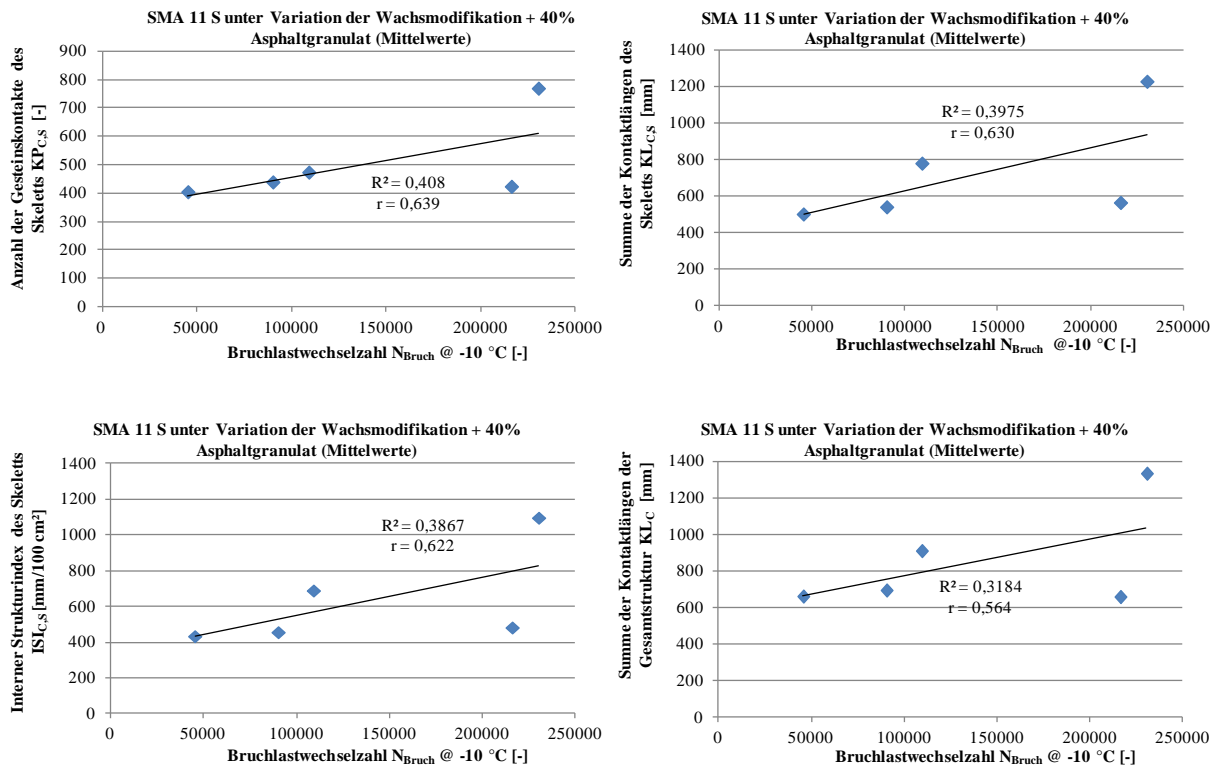


Abbildung 64. Korrelationen zwischen der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und Strukturindizes unter Einbeziehung der Mittelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur -10 °C und einer Stichprobenbegrenzung hinsichtlich der Granulatzugabemenge.

Für die SMA-Varianten ohne Asphaltgranulat und mit 20 M.-% Asphaltgranulat können dagegen keine eindeutigen Korrelationen zwischen Strukturindizes und Bruchlastwechselzahl bei -10 °C festgestellt werden. Welche Effekte hierfür ursächlich sind, kann im Rahmen dieser Untersuchungen nicht geklärt werden.

5.3 Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und Verformungswiderstand

Zur Analyse des Zusammenhangs zwischen innerer Asphaltstruktur und Verformungswiderstand, wurden der Verformungswiderstand mittels Triaxialversuch (vgl. Abschnitt 4.2.2.2) prüftechnisch angesprochen. Anschließend wurden Strukturindizes mittels Bildanalyse an den zylindrischen Asphalt-Probekörpern gewonnen (vgl. Abschnitt 4.3). Durch dieses Vorgehen wird in erster Linie der Zusammenhang der inneren Asphaltstruktur mit dem Verformungswiderstand hinsichtlich der Auswirkung der Druckbelastung auf die resultierende innere Asphaltstruktur untersucht. Ergänzend wurden Strukturindizes an zylindrischen Asphalt-Probekörpern vor der prüftechnischen Ansprache des Verformungswiderstand mittels Triaxialversuch bestimmt (vgl. Abschnitt 5.3.3)

Die nachfolgende statistische Betrachtung basiert auf der Untersuchung von linearen Zusammenhängen der Parameter (lineare Regression). Es wird der gleiche Bewertungsmaßstab für die Güte der Korrelation wie bei den Untersuchungen zum Zusammenhang der inneren Asphaltstruktur und des Ermüdungswiderstands verwendet (vgl. Abschnitt 5.2, Tabelle 11).

Im Rahmen der statistischen Analyse werden die Stichproben bezüglich der Art des Asphaltgranulats (Abschnitt 5.3.1) und der Zugabemenge (Abschnitt 5.3.2) eingegrenzt, um eine Überlagerung dieser Einflüsse auszuschließen (Tabelle 21).

Tabelle 21: Bezeichnungen der Stichprobeneingrenzungen zur statistischen Analyse des Zusammenhangs zwischen Strukturindizes und Verformungswiderstand des Asphalts

Variantenbezeichnung	Bedeutung / Stichprobenumfang
B4	Asphaltgranulat B4 bei Variation der Zugabemenge
B3	Asphaltgranulat B3 bei Variation der Zugabemenge
20 %	20 % Zugabe von Asphaltgranulat bei Variation der Art des Granulats
40 %	40 % Zugabe von Asphaltgranulat bei Variation der Art des Granulats
60 %	60 % Zugabe von Asphaltgranulat bei Variation der Art des Granulats

Die Strukturindizes werden der im Triaxialversuch ermittelten akkumulierten axialen plastischen Dehnung nach 25.000 Lastwechseln (im Folgenden plastische Dehnung) gegenübergestellt. Da die plastische Dehnung direkt mit der Kriechrate im Zusammenhang steht, wird diese nicht gesondert betrachtet.

5.3.1 Korrelationen in Abhängigkeit von der Art des Asphaltgranulats

In Tabelle 22 sind die Ergebnisse der statistischen Analyse zum Zusammenhang der plastischen Dehnung und der Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte und der Stichprobeneingrenzung bezüglich der Art des Asphaltgranulats dargestellt.

Tabelle 22: Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit Asphaltgranulat B4

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,930**	sehr stark	ϵ_{pd}	VM _{C,S}	B4	P
2	0,853**			VM _C	B4	P
3	0,836**			ISI _{C,S}	B4	P
4	0,835**			KL _{C,S}	B4	P
5	0,824**			ISI _C	B4	P
6	0,821**			KL _C	B4	P
7	0,813**			KP _{C,S}	B4	P
8	0,812**			KP _C	B4	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Für die AC 16-Varianten mit Asphaltgranulat B4 werden sehr stark ausgeprägte Korrelationen zwischen sämtlichen Strukturindizes und der plastischen Dehnung festgestellt. Alle Korrelationswerte liegen über 0,800 und sind hoch signifikant. Am stärksten korrelieren die Vektormagnituden (VM_{C,S}, VM_C) mit Werten von 0,930 und 0,853. Weiterhin zeigen die Strukturindizes des Asphaltskeletts höhere Korrelationen im Vergleich zu den entsprechenden Struktur-

indizes der Gesamtstruktur (Tabelle 22). In Abbildung 65 sind die vier stärksten Korrelationen dargestellt.

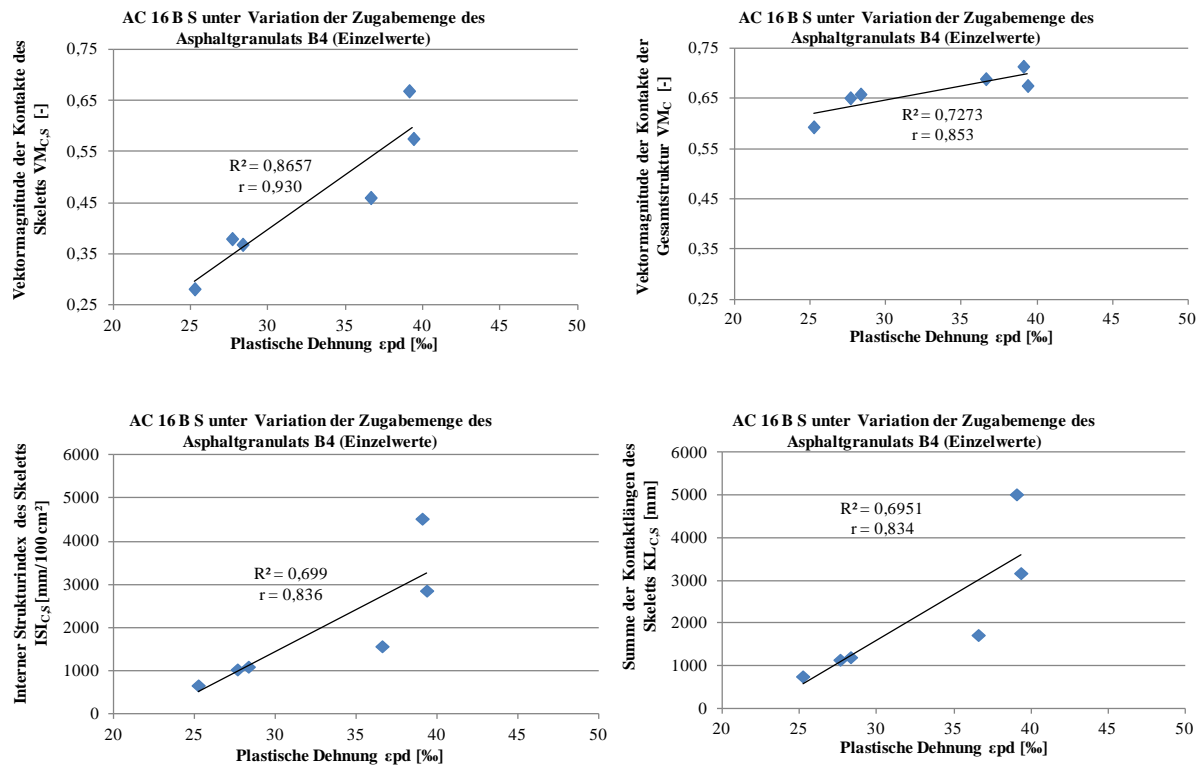


Abbildung 65. Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit Asphaltgranulat B4.

Die festgestellten Zusammenhänge zwischen Strukturindex und den plastischen Dehnungen aus dem Triaxialversuch sind positiv. Steigende Werte des Strukturindex korrelieren somit mit höheren plastischen Dehnungen. Hinsichtlich der Auswirkung der Druckbelastung auf die innere Asphaltstruktur ist dies plausibel. Ein Asphalt-Probekörper mit geringem Verformungswiderstand weist nach der Prüfung durch die Druckbelastung höhere plastische Dehnungen auf, als ein Asphalt-Probekörper mit einem hohen Verformungswiderstand. Die Stauung des Asphalt-Probekörpers durch die Druckbelastung kann als eine Art "Nachverdichtung" interpretiert werden, die zu einer Zunahme der Kontaktpunkte /-längen führt. Weiterhin ist zu erwarten, dass sich die Gleichmäßigkeit der Kornausrichtung, charakterisiert durch die Vektormagnitude VM tendenziell durch die Druckbelastung erhöht. Dies deckt sich auch mit Erkenntnissen von Masad et al. (1999 und 2002a), die diesen Zusammenhang mittels CT-Scans untersuchten.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen an den AC 16-Varianten mit Asphaltgranulat B3 bestätigen den positiven Zusammenhang zwischen Strukturindex und plastischer Dehnung (Tabelle 23).

Tabelle 23: Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit Asphaltgranulat B3

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,735**	stark	ϵ_{pd}	ISI _C	B3	P
2	0,734**			KL _C	B3	P
3	0,712**			KP _{C,S}	B3	P
4	0,711**			ISI _{C,S}	B3	P
5	0,709**			KL _{C,S}	B3	P
6	0,655**			KP _C	B3	P
7	0,653**			VM _C	B3	P
8	0,620*			VM _{C,S}	B3	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Für die AC 16-Varianten mit Asphaltgranulat B3 werden stark ausgeprägte Korrelationen zwischen sämtlichen Strukturindizes und der plastischen Dehnung festgestellt. Die Korrelationswerte liegen zwischen 0,620 und 0,735 und sind bis auf eine Ausnahme hoch signifikant. In Abbildung 66 sind die vier stärksten Korrelationen dargestellt.

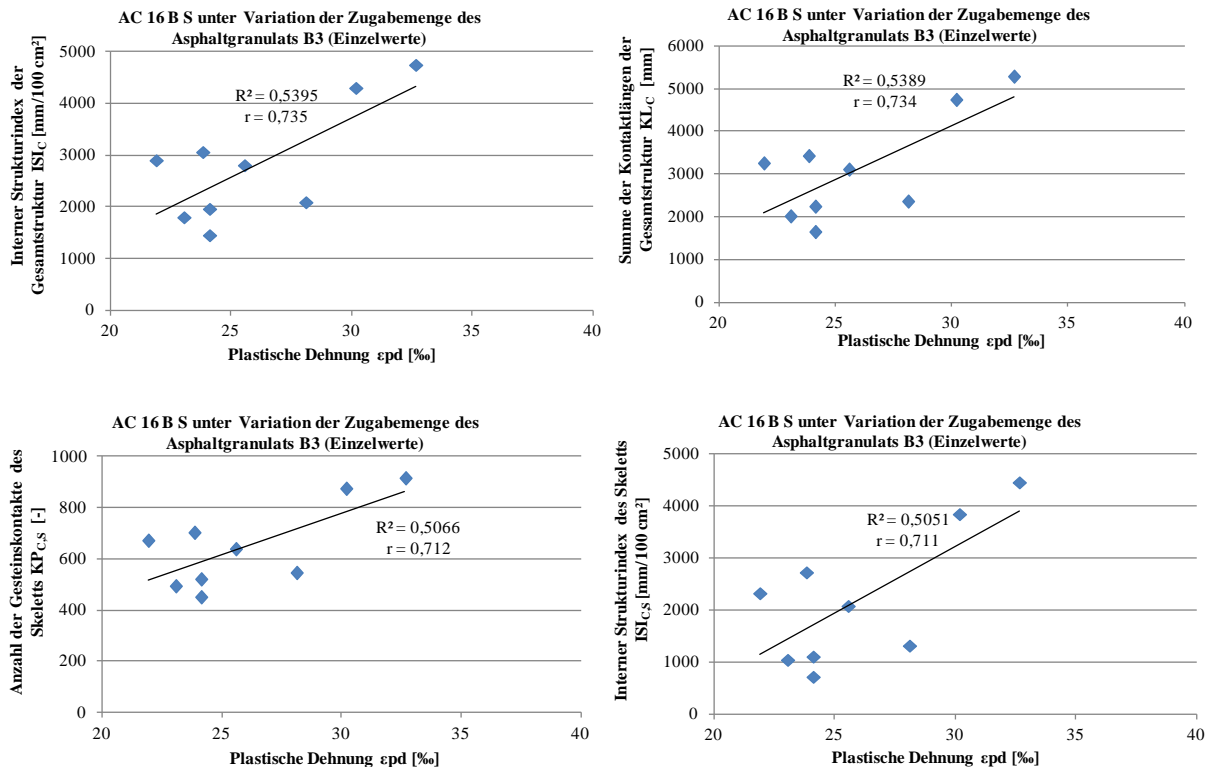


Abbildung 66. Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit Asphaltgranulat B3.

Die festgestellten Zusammenhänge zwischen Strukturindex und den plastischen Dehnungen aus dem Triaxialversuch sind positiv. Steigende Werte des Strukturindex korrelieren somit mit höheren plastischen Dehnungen.

5.3.2 Korrelationen in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Asphaltgranulats

Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen an den AC 16-Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat unterschiedlicher Art bestätigen den positiven Zusammenhang zwischen Strukturindex und plastischer Dehnung (Tabelle 24).

Tabelle 24: Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat unterschiedlicher Art

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,938**	sehr stark	ϵ_{pd}	VM _C	20 %	P
2	0,849**			KL _C	20 %	P
3	0,841**			ISI _C	20 %	P
4	0,825**			KL _{C,S}	20 %	P
5	0,818**			ISI _{C,S}	20 %	P
6	0,777**	stark		VM _{C,S}	20 %	P
7	0,669*			KP _{C,S}	20 %	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Für die AC 16-Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat unterschiedlicher Art werden überwiegend sehr stark ausgeprägte Korrelationen zwischen sämtlichen Strukturindizes und der plastischen Dehnung festgestellt. Die Korrelationswerte liegen zwischen 0,938 und 0,669 und sind bis auf eine Ausnahme hoch signifikant. Abbildung 67 zeigt die vier stärksten Korrelationen.

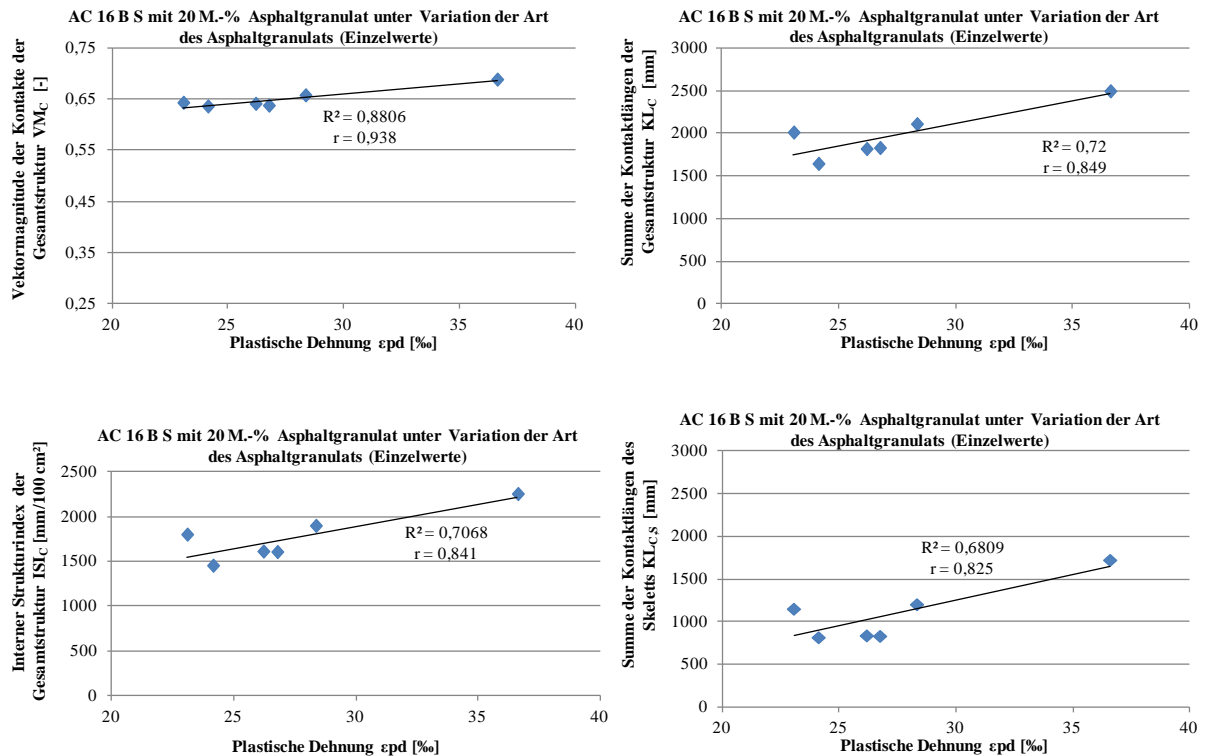


Abbildung 67. Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat unterschiedlicher Art.

Die festgestellten Zusammenhänge zwischen Strukturindex und den plastischen Dehnungen aus dem Triaxialversuch sind positiv. Steigende Werte des Strukturindex korrelieren somit mit höheren plastischen Dehnungen.

In der statistischen Analyse mit der Stichprobeneingrenzung bezüglich der Varianten mit 40 M.-% und 60 M.-% Zugabeanteil wurden lediglich sehr schwach ausgeprägte Korrelationen gefunden und werden daher nicht aufgeführt.

5.3.3 Korrelationen unbelastete innere Asphaltstruktur

Um den Zusammenhang zwischen der unbelasteten inneren Asphaltstruktur und dem Verformungswiderstand zu untersuchen, wurden zusätzliche zylindrische Asphalt-Probekörper hergestellt und an diesen vor der prüftechnischen Ansprache des Verformungswiderstand die Strukturindizes mittels Bildanalyse bestimmt.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen an den AC 16-Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat unterschiedlicher Art ergeben einen positiven Zusammenhang zwischen Strukturindex der unbelasteten Asphalt-Probekörper und der plastischen Dehnung (Tabelle 25).

Tabelle 25: Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat unterschiedlicher Art

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,722**	stark	ϵ_{pd}	KP _C	60%	P
2	0,716**			KP _{C,S}	60%	P
3	0,625**			KL _{C,S}	60%	P
4	0,613**			ISI _{C,S}	60%	P
5	0,566**	mittel		KL _C	60%	P
6	0,542*			ISI _C	60%	P
7	0,433*			VM _{C,S}	60%	P
8	0,420*			VM _C	60%	P

**hoch signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 1%

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Für die AC 16-Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat werden mittel bis stark ausgeprägte Korrelationen zwischen den Strukturindizes der unbelasteten Asphalt-Probekörper und der plastischen Dehnung festgestellt. Die Korrelationswerte liegen zwischen 0,722 und 0,420 und sind signifikant bis hoch signifikant. In Abbildung 68 sind die vier stärksten Korrelationen dargestellt.

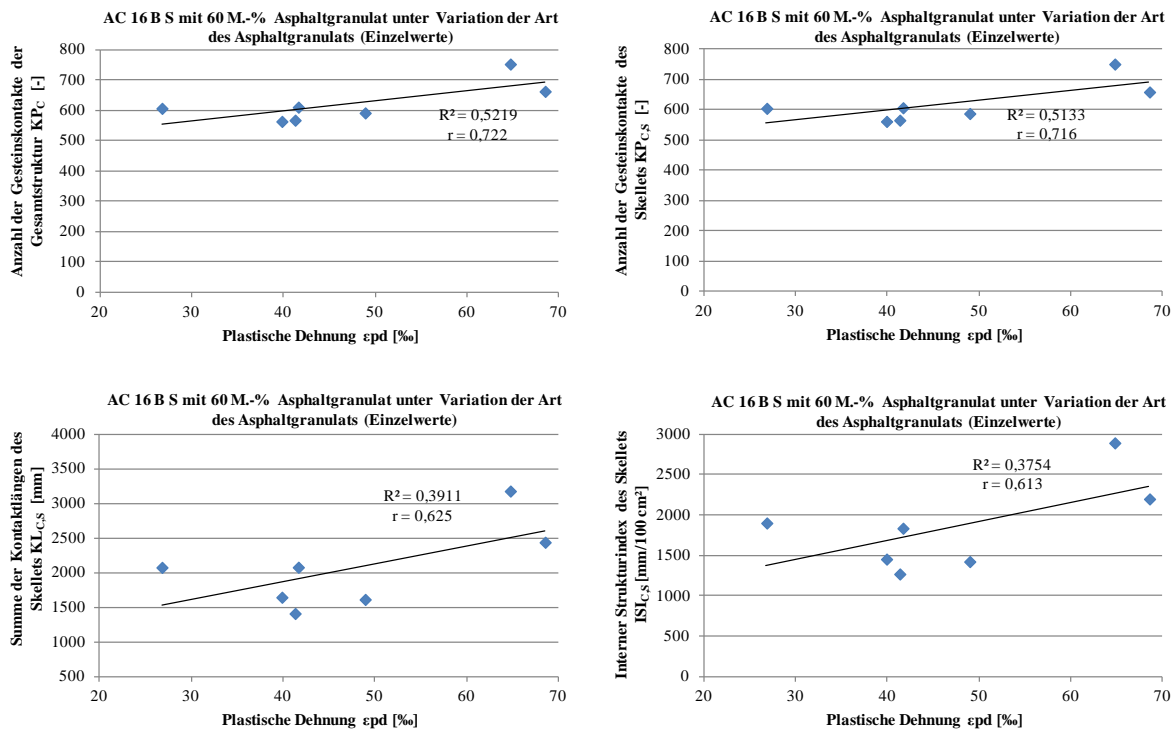


Abbildung 68. Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes der unbelasteten Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der AC 16-Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat unterschiedlicher Art.

Zunächst ist festzuhalten, dass sich der positive Zusammenhang zwischen plastischer Dehnung und den Strukturindizes der unbelasteten inneren Asphaltstruktur mit den Korrelationen zwischen plastischer Dehnung und den Strukturindizes der belasteten inneren Asphaltstruktur nach Durchführung des Triaxialversuchs decken. Dies ist jedoch insofern nicht plausibel, da in der Theorie hohe Werte der Strukturindizes der unbelasteten Struktur eine verformungsresistentere Struktur repräsentieren sollten. Demnach sollte beispielsweise eine hohe Anzahl an Gesteinskontakten zu entsprechend geringeren plastischen Dehnung im Triaxialversuch führen. Werden sämtliche Strukturindizes der unbelasteten inneren Asphaltstruktur in die Korrelationsanalyse einbezogen, also keine Stichprobenbegrenzung vorgenommen, kann kein statistischer Zusammenhang zwischen den Strukturindizes der unbelasteten inneren Asphaltstruktur und der plastischen Dehnung nachgewiesen werden. Beispielhaft ist hierzu in Abbildung 69 der Zusammenhang zwischen plastischer Dehnung und Anzahl der Gesteinskontakte und Summe der Kontaktlängen dargestellt.

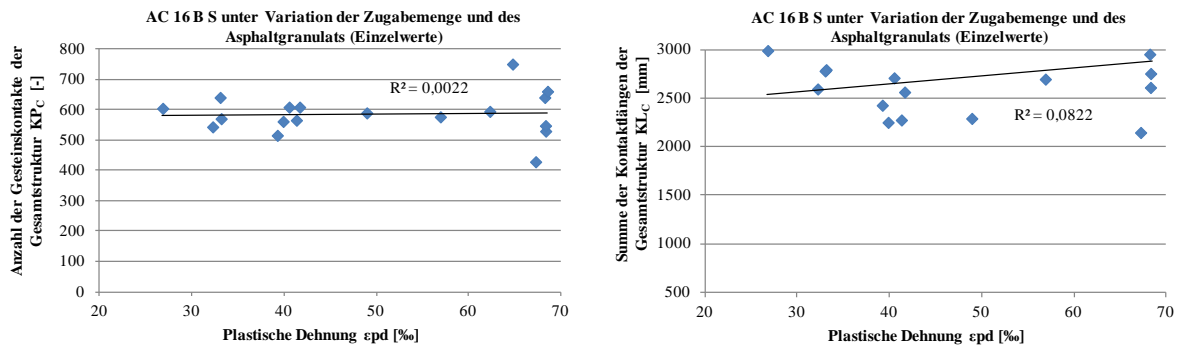


Abbildung 69. Korrelationen zwischen der plastischen Dehnung ϵ_{pd} aus dem Triaxialversuch und den Strukturindizes der unbelasteten Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der sämtlicher Einzelwerte der AC 16-Varianten ohne Stichprobeneingrenzung.

5.4 Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf innere Asphaltstruktur

Um den Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf die innere Asphaltstruktur zu untersuchen, wurden zunächst an ausgewählten Asphaltvarianten die zugehörigen Asphaltmörtelphasen (Füller-Bitumen-Gemische) rückgewonnen und anschließender zielgenau zusammengesetzt. Die rheologischen Eigenschaften der Asphaltmörtel wurden mittels dynamischem Scherreometer (DSR) bestimmt (vgl. Abschnitt 4.2.1).

5.4.1 Korrelationen komplexer Schermodul und Phasenwinkel

Die innere Struktur des Asphalts bildet sich im Wesentlichen während der Asphaltherstellung beim Verdichtungsverfahren aus. Daher ist davon auszugehen, dass die Asphaltmörtelviskositäten im hohen Temperaturbereich ($> 60\text{ °C}$) eine Rolle bei der Ausbildung der inneren Asphaltstruktur während der Verdichtung spielen könnten. Asphaltmörtelviskositäten im niedrigen Temperaturbereich ($< 60\text{ °C}$) sind vernachlässigbar, da in diesem Temperaturbereich keine Verdichtung mehr stattfinden kann und daher auch keine wesentlichen Änderungen in der inneren Asphaltstruktur zu erwarten sind.

Aus diesem Grund werden zunächst für die statistische Betrachtung aus den Ergebnissen der Temperatursweeps am DSR für die Temperaturen $+60\text{ °C}$, $+80\text{ °C}$ und $+100\text{ °C}$ der

- komplexe Schermodul G^* und
- der zugehörige Phasenwinkel δ

zur Untersuchung auf Korrelation mit den Strukturindizes herangezogen. Sämtliche Ergebnisse dieser Korrelationsanalysen sind im Anhang (b) bis (d) aufgeführt.

Die statistische Betrachtung basiert auf der Untersuchung von linearen Zusammenhängen der Parameter (lineare Regression). Es wird der gleiche Bewertungsmaßstab für die Güte der Korrelation wie bei den Untersuchungen zum Zusammenhang der inneren Asphaltstruktur und dem Ermüdungswiderstand verwendet (vgl. Abschnitt 5.2, Tabelle 11).

(a) Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei +60 °C

Auf Basis der Ergebnisse der Korrelationsanalyse können keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem komplexen Schermodul G^* des Asphaltmörtels bei +60 °C und den Strukturindizes identifiziert werden (Tabelle 26 und Abbildung 70).

Tabelle 26: Korrelationen zwischen dem komplexen Schermoduls G^* des Asphaltmörtels bei +60 °C und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,372*	schwach	G* bei +60 °C	VM _{C,S}	5 °C	P
2	0,317*			VM _C	5 °C	P
3	0,093*	sehr schwach		KP _{C,S}	5 °C	P
4	0,044*			ISI _C	5 °C	P
5	0,030*			KL _C	5 °C	P
6	0,017*			KP _C	5 °C	P
7	0,014*			KL _{C,S}	5 °C	P
8	0,001*			ISI _{C,S}	5 °C	P

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

$KP_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

$KL_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

$VM_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Vektormagnitudo der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

$ISI_{C \text{ bzw. } C,S}$ = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Es ergeben sich lediglich für die Vektormagnitudo des Asphaltskeletts ($VM_{C,S}$) und der Gesamtstruktur (VM_C) schwache Korrelationen (bis zu 0,372). Alle weiteren Strukturindizes ergeben sich praktisch unabhängig von komplexen Schermodul des Asphaltmörtels bei +60 °C, erkennbar an den sehr kleinen Korrelationswerten < 0,100.

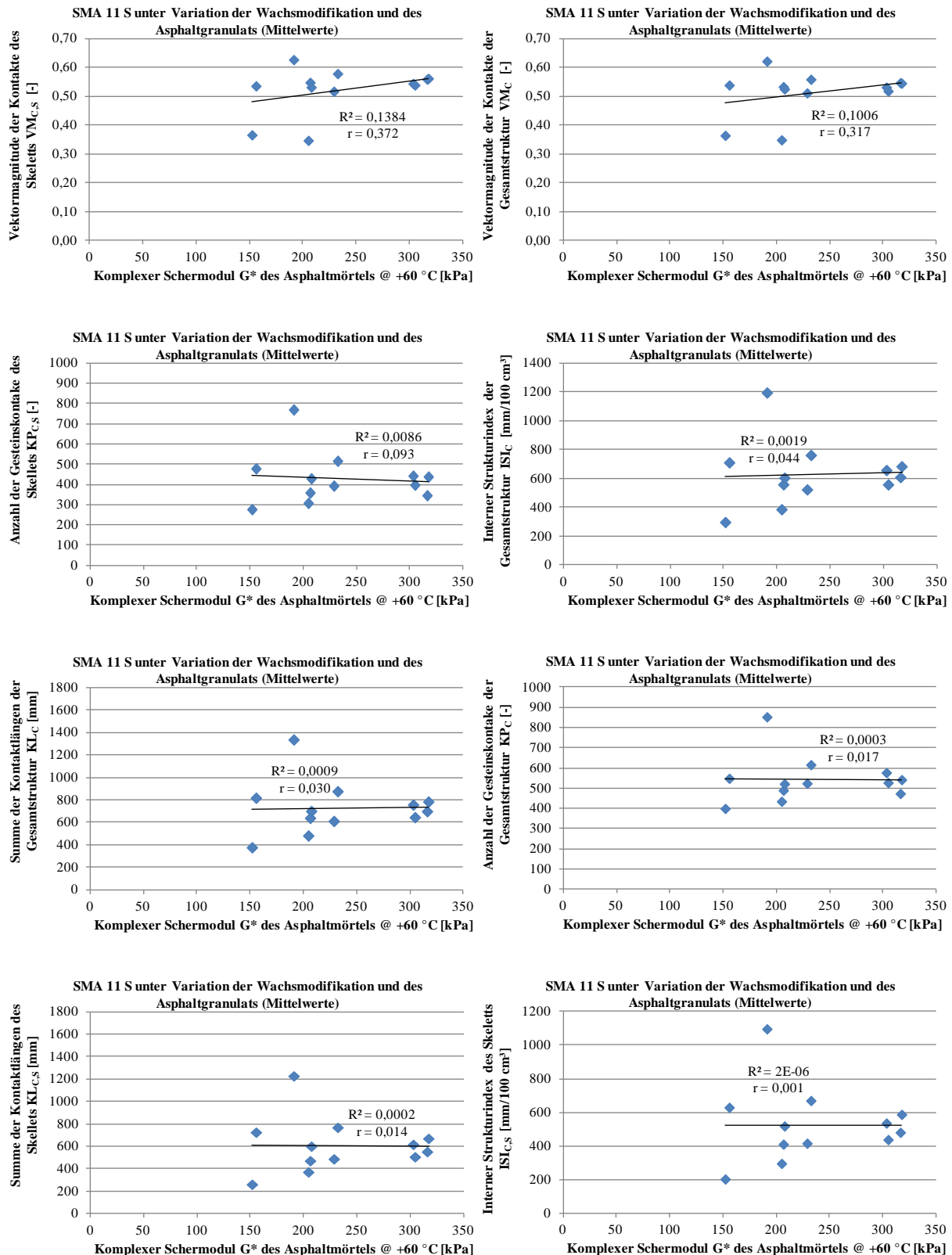


Abbildung 70. Korrelationen zwischen dem komplexen Schermodul G^* des Asphaltmörtels bei +60 °C und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zum Phasenwinkel δ des Asphaltmörtels bei +60 °C und den Strukturindizes enthält Tabelle 27.

Tabelle 27: Korrelationen zwischen dem Phasenwinkel δ des Asphaltmörtels bei +60 °C und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,244*	schwach	δ bei +60 °C	ISI _C	5 °C	P
2	0,221*			KL _C	5 °C	P
3	0,214*			KL _{C,S}	5 °C	P
4	0,210*			ISI _{C,S}	5 °C	P
5	0,208*			KP _{C,S}	5 °C	P
6	0,207*			KP _C	5 °C	P
7	0,082*	sehr schwach		VM _C	5 °C	P
8	0,024*			VM _{C,S}	5 °C	P

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Insgesamt werden keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem Phasenwinkel des Asphaltmörtels und den Strukturindizes festgestellt. Es ergeben sich überwiegend nur schwache bis sehr schwache Korrelationen, sodass kein systematischer Einfluss des Phasenwinkels des Asphaltmörtels bei +60 °C auf die resultierende Asphaltstruktur identifiziert werden kann.

(b) Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei +80 °C und +100 °C

Die Korrelationsuntersuchungen zum komplexen Schermodul und zum Phasenwinkel des Asphaltmörtels bei +80 °C und zu den Strukturindizes liefern keinen Hinweis auf einen systematischen Zusammenhang der jeweils betrachteten Parameter, womit die Erkenntnisse aus den Korrelationsanalysen bei +60 °C bestätigt werden. Sämtliche Korrelationen sind lediglich schwach oder sehr schwach ausgeprägt. Aus diesem Grund werden diese Ergebnisse weiter nicht ausgeführt. Eine vollständige Dokumentation enthält Anhang (b).

Im Weiteren können auf Basis der Ergebnisse der Korrelationsanalyse im höchsten Temperaturbereich keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem komplexen Schermodul G^* des Asphaltmörtels bei +100 °C und den Strukturindizes identifiziert werden (Tabelle 28 und Abbildung 71).

Tabelle 28: Korrelationen zwischen dem komplexen Schermoduls G^* des Asphaltmörtels bei +100 °C und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,359*	schwach	G* bei +100 °C	VM _{C,S}	5 °C	P
2	0,348*			VM _C	5 °C	P
3	0,189*	sehr schwach		ISI _C	5 °C	P
4	0,189*			KL _C	5 °C	P
5	0,189*			KL _{C,S}	5 °C	P
6	0,188*			ISI _{C,S}	5 °C	P
7	0,138*			KP _C	5 °C	P
8	0,126*			KP _{C,S}	5 °C	P

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

In Analogie zu den Ergebnissen bei +60 °C werden lediglich schwache Korrelationen (bis zu 0,359) für die Vektormagnituden festgestellt, während alle weiteren Korrelationen sehr schwach ausgeprägt sind.

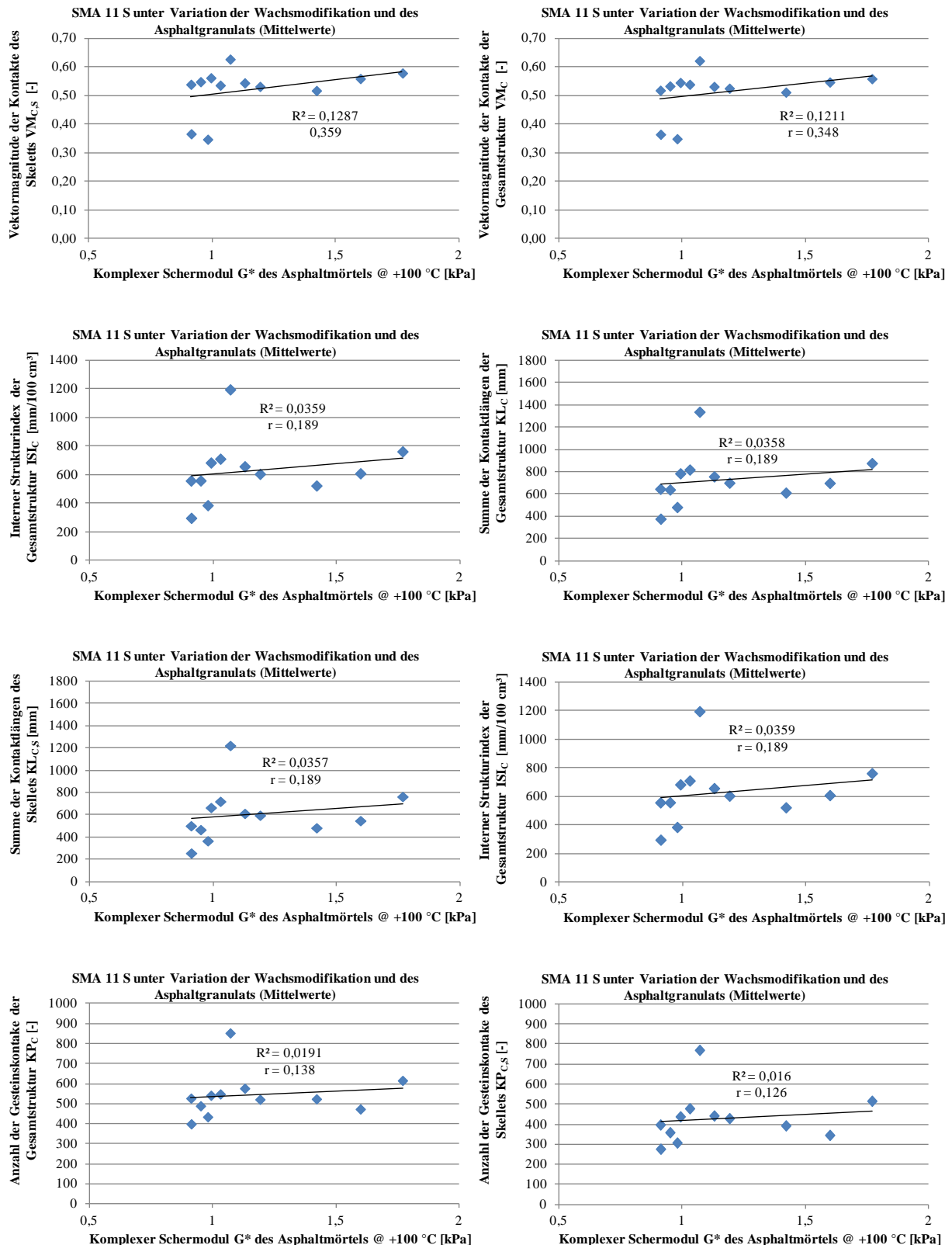


Abbildung 71. Korrelationen zwischen dem komplexen Schermodul G^* des Asphaltmörtels bei +100 °C und der Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zum Phasenwinkel δ des Asphaltmörtels bei +100 °C und zu den Strukturindizes enthält Tabelle 29.

Tabelle 29: Korrelationen zwischen dem Phasenwinkel δ des Asphaltmörtels bei +100 °C und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,357*	schwach	δ bei +100 °C	ISI _C	5 °C	P
2	0,355*			KL _C	5 °C	P
3	0,340*			KL _{C,S}	5 °C	P
4	0,340*			ISI _{C,S}	5 °C	P
5	0,337*			KP _{C,S}	5 °C	P
6	0,335*			KP _C	5 °C	P
7	0,172*	sehr schwach		VM _C	5 °C	P
8	0,117*			VM _{C,S}	5 °C	P

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Es werden lediglich schwache positive Zusammenhänge zwischen dem Phasenwinkel des Asphaltmörtels bei +100 °C und den Strukturindizes festgestellt. Ein systematischer Zusammenhang liegt somit nicht vor.

5.4.2 Korrelationen Äqui-Schermodul-Temperatur und Phasenwinkel

Zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften der Asphaltmörtel wurden neben dem komplexen Schermodul und dem zugehörigen Phasenwinkel bei unterschiedlichen Temperaturen weitere Parameter in den Korrelationsanalysen berücksichtigt. Konkret wurde für einen vorgegebenen komplexen Schermodul von 15 kPa die Äqui-Schermodul-Temperatur (T_{BTSV}) und der zugehörige Phasenwinkel (δ_{BTSV}) der Asphaltmörtel ermittelt (vgl. Abschnitt 4.2.1).

Die Korrelationsanalyse zeigt keine systematischen Zusammenhänge zwischen der Äqui-Schermodul-Temperatur des Asphaltmörtels und den Strukturindizes (Tabelle 30).

Tabelle 30: Korrelationen zwischen der Äqui-Schermodul-Temperatur T_{BTSV} des Asphaltmörtels und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,370*	schwach	T _{BTSV} bei 15 kPa	VM _{C,S}	5 °C	P
2	0,322*			VM _C	5 °C	P
3	0,087*	sehr schwach		ISI _C	5 °C	P
4	0,078*			KL _C	5 °C	P
5	0,066*			KP _C	5 °C	P
6	0,050*			ISI _{C,S}	5 °C	P
7	0,040*			KL _{C,S}	5 °C	P
8	0,014*			KP _{C,S}	5 °C	P

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_C bzw. C,S = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_C bzw. C,S = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_C bzw. C,S = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_C bzw. C,S = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Es ergeben sich lediglich für die Vektormagnitude des Asphaltskeletts ($VM_{C,S}$) und der Gesamtstruktur (VM_C) schwache Korrelationen (bis zu 0,370). Alle weiteren Strukturindizes weisen keine nachweisbare Korrelation mit der Äqui-Schermodul-Temperatur des Asphaltmörtels bei 15 kPa auf (Abbildung 72).

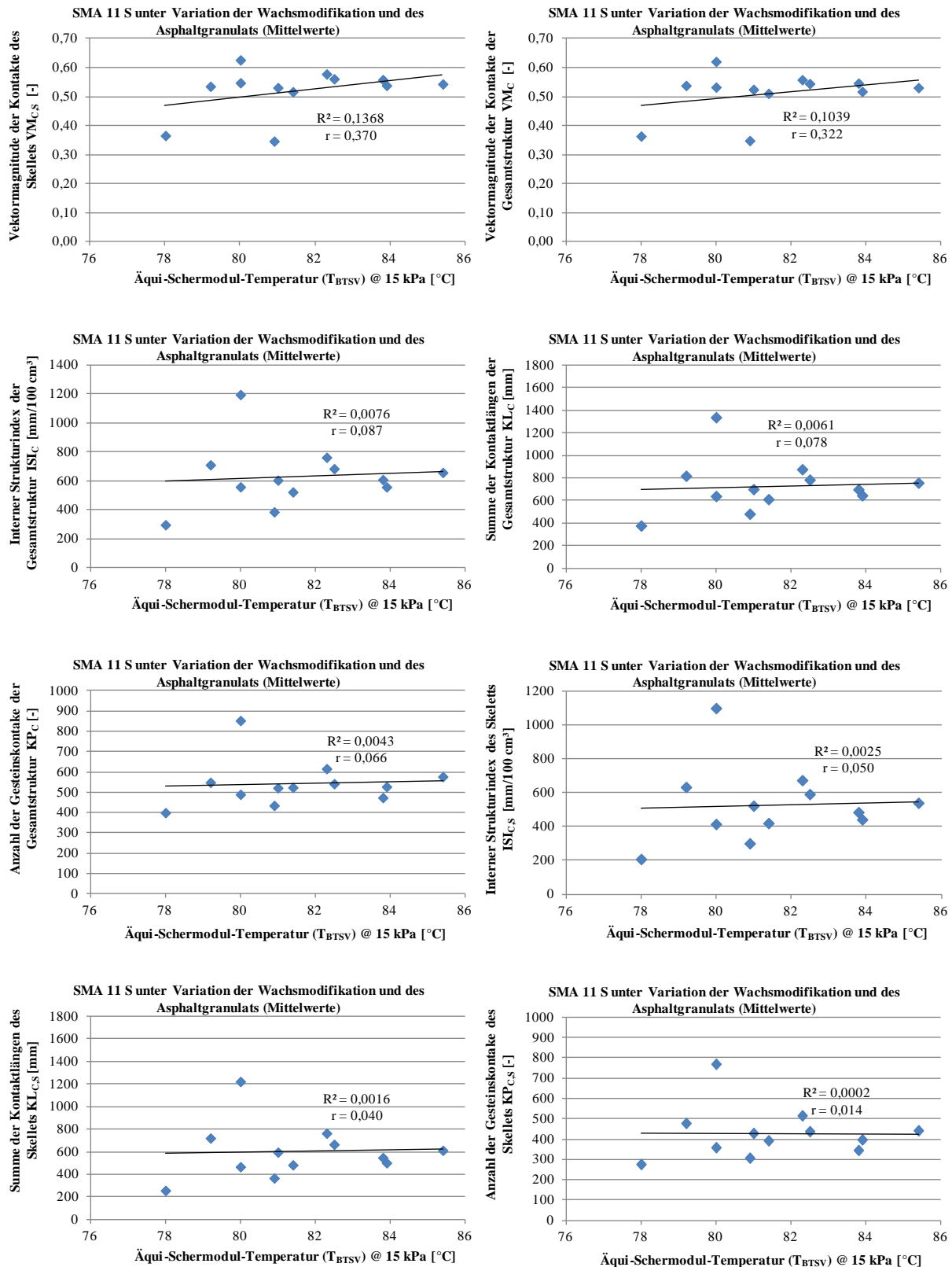


Abbildung 72. Korrelationen zwischen der Äqui-Schermodul-Temperatur T_{BTSV} des Asphaltmörtels und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

Anhand der Ergebnisse der Korrelationsanalyse zum Äqui-Schermodul-Phasenwinkel δ_{BTSV} werden schwache bis mittlere Korrelationen zwischen δ_{BTSV} des Asphaltmörtels und den

jeweiligen Strukturindizes identifiziert (Tabelle 31). In der Tendenz werden mit steigendem Phasenwinkel δ_{BTSV} größere Werte für die Strukturindizes festgestellt. Dies bedeutet, dass ein Asphaltmörtel mit einem überwiegend viskosen Materialverhalten bei 15 kPa (hoher Wert δ_{BTSV}) zu einer größeren Anzahl an Kontaktpunkten und -längen in der resultierenden inneren Asphaltstruktur führt im Vergleich zu einer Asphaltstruktur, die sich mit einem weniger viskosen Asphaltmörtel ausgebildet hat.

Tabelle 31: Korrelationen zwischen dem Äqui-Scherm modul-Phasenwinkel δ_{BTSV} des Asphaltmörtels und den Strukturindizes unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen bei der Prüftemperatur +5 °C

Rangliste	Korrelationswert [-]	Ausprägung der Korrelation	1. Kennzahl	2. Kennzahl	Stichprobe	
1	0,411*	mittel	δ_{BTSV} bei 15 kPa	ISI _C	5 °C	P
2	0,408*			KL _C	5 °C	P
3	0,404*			KL _{C,S}	5 °C	P
4	0,404*			ISI _{C,S}	5 °C	P
5	0,395*	schwach		KP _{C,S}	5 °C	P
6	0,382*			KP _C	5 °C	P
7	0,380*			VM _C	5 °C	P
8	0,330*			VM _{C,S}	5 °C	P

*signifikant; Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%

P = Signifikanz. nach Pearson \approx Signifikanz nach Spearman

KP_{C bzw. C,S} = Anzahl der Gesteinskontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

KL_{C bzw. C,S} = Summe der Kontaktlängen der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm]

VM_{C bzw. C,S} = Vektormagnitude der Kontakte der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [-]

ISI_{C bzw. C,S} = Interner Strukturindex der Gesamtstruktur bzw. des Skeletts [mm/100 cm²]

Die Differenzierung zwischen den schwachen und mittleren Korrelationen ist insofern schwierig, da sich die Korrelationswerte in einem engen Bereich zwischen 0,330 und 0,411 bewegen und die Grenze zwischen schwacher und mittlerer Korrelation bei 0,400 liegt. Insgesamt kann jedoch ein schwacher bis mittlerer, positiver Zusammenhang zwischen δ_{BTSV} und den jeweiligen Strukturindizes nachgewiesen werden (Abbildung 73).

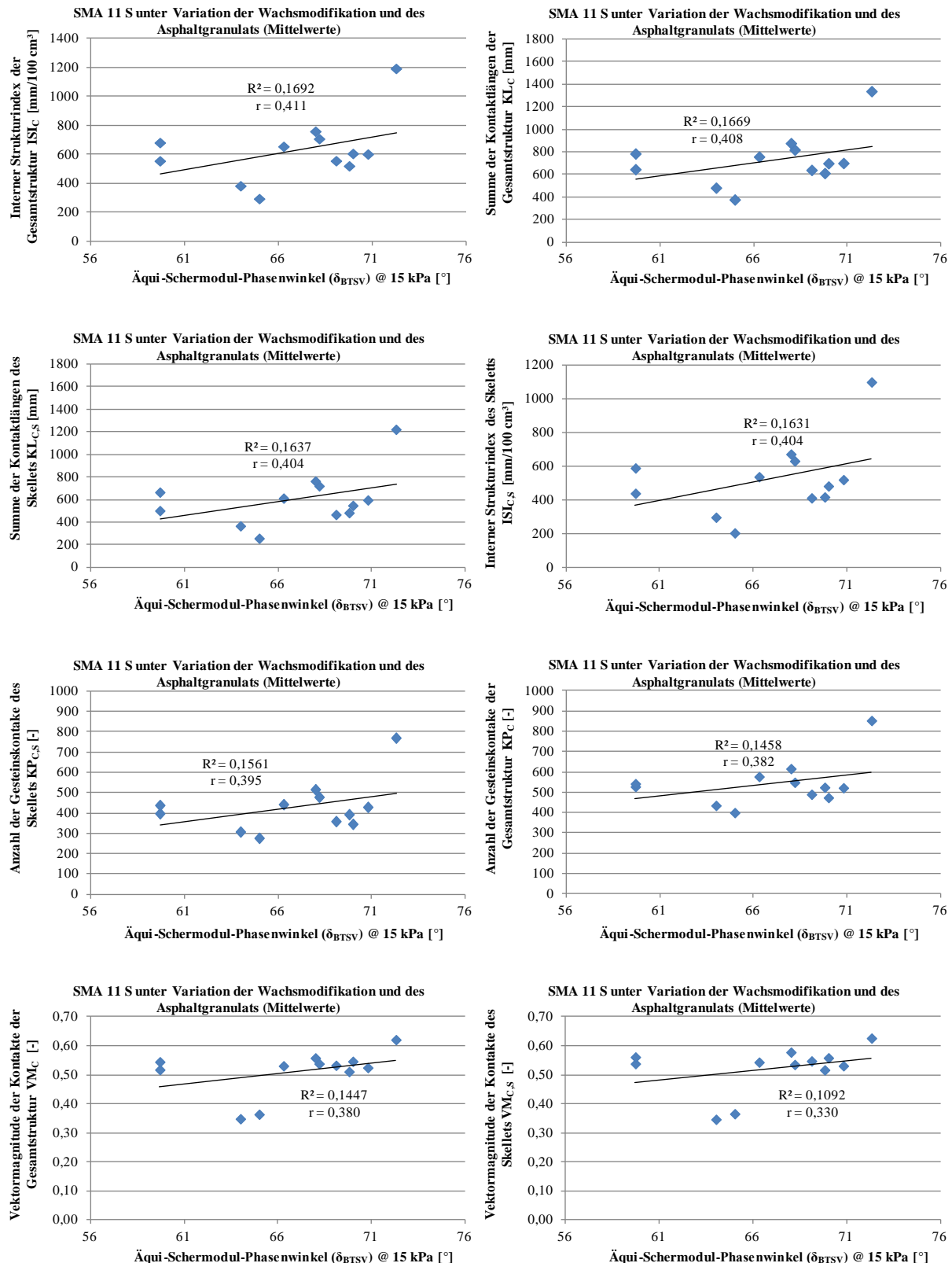


Abbildung 73. Korrelationen zwischen dem Äqui-Schermodul-Phasenwinkel δ_{BTSV} des Asphaltmörtels und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

5.5 Schlussfolgerungen

Aufgrund der referierten Ergebnisse der Korrelationsanalysen (Abschnitte 5.1 bis 5.4) lassen sich folgende, nach den jeweiligen Zusammenhängen gegliederte Schlussfolgerungen ziehen.

(a) Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und Ermüdungswiderstand

Es besteht insgesamt ein positiver, systematischer Zusammenhang zwischen der inneren Asphaltstruktur, charakterisiert durch die Strukturindizes und dem Ermüdungswiderstand des Asphalts, beurteilt anhand der Bruchlastwechselzahl bei +5 °C und -10 °C. Demnach zeigen Varianten mit einer stärker "verzahnten" inneren Asphaltstruktur (hohe Werte der Strukturindizes) im Vergleich zu Varianten mit einer weniger "verzahnten" inneren Asphaltstruktur (geringe Werte der Strukturindizes) einen größeren Ermüdungswiderstand.

Für den Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und dem Ermüdungswiderstand liegt bei Überlagerung der Einflüsse durch Variation der Wachsmodifikation und Asphaltgranulatart und -menge ein mittleres Korrelationsniveau vor. Nach Stichprobeneingrenzung zur getrennten Betrachtung der Einflüsse ergibt sich ein sehr hohes Korrelationsniveau.

In der Tendenz weisen die Strukturindizes des Asphaltskeletts im Vergleich zu jenen der Gesamtstruktur eine stärkere Korrelation zum Ermüdungswiderstand auf. Dies ist plausibel, da dem Asphaltskelett in der Theorie die primäre lastabtragende Wirkung zugeschrieben wird.

Unter den Strukturindizes üben die rein kontaktbasierten Parameter (Anzahl Gesteinskontakte, Summe Kontaktlängen) einen größeren Einfluss auf den Ermüdungswiderstand aus im Vergleich zu den kontakt- und orientierungsbasierten Parametern, wie die durchschnittliche Anisotropie der Kontaktorientierungsverteilung und die Summe der Widerstandskomponenten in Lastrichtung. Dies deutet darauf hin, dass für die Lastabtragung der in diesem Falle mit dem Zug-Schwellversuch induzierten Zugkräfte die Verzahnung der inneren Asphaltstruktur von größerer Bedeutung ist, als die Orientierung der Gesteinskörner und der Gesteinskontakte.

(b) Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und Verformungswiderstand

Unter Einschränkung der Stichproben besteht insgesamt ein positiver, systematischer Zusammenhang zwischen der inneren Asphaltstruktur, charakterisiert durch die Strukturindizes und der resultierenden Asphaltstruktur. Hierdurch wird die Auswirkung der Druckbelastung aus der Triaxialprüfung auf die innere Asphaltstruktur am Versuchsende deutlich. Demnach korrelieren hohe plastische Dehnungen mit hohen Werten der Strukturindizes. Folgerichtig weist ein Asphalt-Probekörper mit geringem Verformungswiderstand nach der Triaxialprüfung höhere plastische Dehnungen auf als ein Asphalt-Probekörper mit einem hohen Verformungswiderstand. Die Stauchung des Asphalt-Probekörpers durch die Druckbelastung kann als eine Art "Nachverdichtung" interpretiert werden, die zu einer Änderung der Gesteinsorientierung und im geringeren Maße zu einer Zunahme der Anzahl an Gesteinskontakten führt.

Die Korrelationen sind je nach Stichprobeneingrenzung nach Granulatart und Zugabemenge stark bis sehr stark ausgeprägt. Eine eindeutige Differenzierung zwischen Strukturindizes des Asphalt skeletts im Vergleich zu jenen der Gesamtstruktur ist nicht möglich.

Die kontakt- und orientierungsbasierten Strukturindizes, vor allem die Anisotropie der Kontaktorientierungsverteilung korrelieren im Vergleich zu den rein kontaktbasierten Parametern (Anzahl Gesteinskontakte, Summe Kontaktlängen) stärker mit der plastischen Dehnung am Versuchsende. Demnach wirkt sich die "Nachverdichtung" stärker auf die Kontaktorientierung aus als auf die Anzahl der Gesteinskontakte beziehungsweise die Summe der Kontaktlängen. Dies ist nachvollziehbar, da die in der Triaxialprüfung am Versuchsende festgestellten plastischen Dehnung in einem Bereich von 20 % bis 70 % liegen und damit primär eine geringe Änderung der Kontaktorientierung vollzogen wurde und sekundär eine Verdichtung der inneren Asphaltstruktur resultierend in einem Anstieg der Gesteinskontakte stattgefunden hat.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Auswirkung der inneren Asphaltstruktur auf den resultierenden Verformungswiderstand lassen nur bedingt plausible Schlussfolgerungen zu. Die Strukturindizes wurden am unbelasteten Asphalt-Probekörper bestimmt und mit den resultierenden plastischen Dehnungen am Versuchende verglichen. Bei Stichprobeneingrenzung ergibt sich ein positiver Zusammenhang zwischen den Strukturindizes und der resultierenden plastischen Dehnung. Dies erscheint unplausibel, da in der Theorie hohe Werte der Strukturindizes der unbelasteten Struktur eine auf Druckbelastung stark verformungsresistente Struktur repräsentieren. Eine hohe Anzahl an Gesteinskontakten führen demnach zu geringeren plastischen Dehnung. Ohne Stichprobenbegrenzung kann in der Korrelationsanalyse kein statistischer Zusammenhang zwischen den Strukturindizes der unbelasteten Asphaltstruktur und der resultierenden plastischen Dehnung nachgewiesen werden.

(c) Zusammenhang zwischen Asphaltmörtelviskosität und innerer Asphaltstruktur

Ein systematischer Zusammenhang zwischen der Asphaltmörtelviskosität und der resultierenden inneren Asphaltstruktur konnte nicht erkannt werden. Zwar wurden rheologische Eigenschaften der Asphaltmörtel im Temperaturbereich von +60 °C bis +100 °C in der Korrelationsanalyse mittels komplexem Schermodul und zugehörigem Phasenwinkel berücksichtigt, jedoch sind die Korrelationen nur sehr schwach bis schwach ausgeprägt.

Zusätzlich zum komplexen Schermodul und zugehörigem Phasenwinkel wurde für einen vorgegebenen komplexen Schermodul von 15 kPa die Äqui-Schermodul-Temperatur (T_{BTSV}) und der zugehörige Phasenwinkel (δ_{BTSV}) ermittelt und auf Korrelation mit den Strukturindizes untersucht. Hierbei wird auf einem niedrigen bis mittleren Korrelationsniveau mit steigendem δ_{BTSV} ein Anstieg der Strukturindizes identifiziert. Ein Asphaltmörtel mit einem überwiegend viskosen Materialverhalten bei 15 kPa (hoher Wert δ_{BTSV}) führt demnach zu einer größeren Anzahl an Kontaktpunkten und -längen in der resultierenden inneren Asphaltstruktur im Vergleich zu einer Asphaltstruktur, die sich mit einem weniger viskosen Asphaltmörtel ausgebildet hat.

Insgesamt kann damit auf Basis dieser Ergebnisse die These, dass die Asphaltmörtelviskosität einen systematischen Einfluss auf die resultierende innere Asphaltstruktur ausübt und als Stellschraube fungiert, nicht bestätigt werden.

6 Zusammenfassung

6.1 Problemstellung

Die Konzeption von Asphaltbefestigungen folgt idealerweise dem Grundsatz, dass die Lasten aus der Verkehrsbeanspruchung dauerhaft abgetragen werden können und die Konstruktion widerstandsfähig gegenüber Umweltfaktoren ist. Daher ist es zwingend notwendig, zunächst alle maßgebenden Beanspruchungen zu identifizieren, um die daraus resultierenden Gebrauchseigenschaften der Asphaltbefestigung prognostizieren zu können. Nur so kann durch die adäquate Wahl der Baustoffe und Bauverfahren eine auf die jeweiligen Randbedingungen angepasste Asphaltkonzeption entwickelt und über die Nutzungsdauer der wirtschaftlichste Einsatz von Erhaltungsmaßnahmen garantiert werden.

Zu den grundlegenden Einflussfaktoren auf das Gebrauchsverhalten von Asphalt zählt zunächst die Mischgutzusammensetzung, also die Wahl einer Gesteinsart, einer Korngrößenverteilung und die Festlegung der Bindemittelart/-sorte und -menge.

Neben der Korngrößenverteilung haben die geometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung wie die Kornform, die Kornorientierung und die Oberflächentextur Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften eines Asphalts. Die gegenwärtig im Regelwerk verankerten Methoden zur Bestimmung geometrischer Kenngrößen der Gesteinskörnung liefern keine vollständige Charakterisierung. So wird beispielsweise die Oberflächenbeschaffenheit gem. Europäischer Normung bis dato nur durch visuelle Abschätzung des Masseanteils vollständig gebrochener, gebrochener oder vollständig runder Körner charakterisiert (DIN, 2005). Weiterhin ist es praktisch unmöglich, geometrische Unregelmäßigkeiten einer Gesteinskörnung durch eine einzelne Testmethode anzusprechen, da die unterschiedlichen Parameter wie Kornform, Kornausrichtung oder Oberflächentextur teilweise völlig unabhängig voneinander sind, sie jedoch in ihrer Gesamtheit die geometrische Unregelmäßigkeit der Gesteinskörnung definieren.

Die geometrischen Eigenschaften bestimmen in Verbindung mit der Korngrößenverteilung die grundsätzliche Ausprägung der "inneren Asphaltstruktur", welche letztlich die Tragstruktur von Asphalten nach dem Stützgerüstkonzept bildet. Vor diesem Hintergrund sind diverse Forschungsarbeiten der Entwicklung und Anwendung von bildanalysebasierten Methoden zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung und der Tragstruktur gewidmet. So zeigen beispielsweise Coenen et al. (2011), dass unter Variation der Verdichtungsmethode Asphalt-Probekörper mit vergleichbaren volumetrischen Eigenschaften erhalten werden, sich jedoch gleichzeitig maßgebende Unterschiede in der inneren Asphaltstruktur, charakterisiert durch Kontaktpunkte und -längen des Traggerüsts ergeben.

Ohne Zweifel beeinflussen neben den geometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung und der Korngrößenverteilung auch die Viskosität des Bitumens und des Asphaltmörtels in Verbindung mit der Verdichtungsarbeit die resultierenden Asphalteigenschaften. Offen ist bisher die Frage, ob die Bitumen- beziehungsweise Asphaltmörtelviskosität in einem systematischen Zusammenhang mit der sich ausbildenden inneren Asphaltstruktur steht.

Ziel dieser Arbeit war die Analyse der These, dass das Gebrauchsverhalten von Asphalt – insbesondere der innere Zusammenhalt des Asphalts / die Ermüdungsresistenz – nicht durch die volumetrischen Asphalteigenschaften allein, resultierend aus Mischgutzusammensetzung, Viskosität von Bitumen und Mörtel, Verdichtung etc. beeinflusst wird, sondern durch die „innere Struktur“ maßgeblich mitbestimmt wird. Desweiteren sollte die Frage beantwortet werden, ob beziehungsweise inwieweit die Viskosität des Asphaltmörtels einen Einfluss auf die resultierende innere Asphaltstruktur hat.

6.2 Vorgehen

Um den Einfluss der inneren Struktur und Mörtelviskosität auf die Resistenz von Asphalt gegenüber Versagen zu untersuchen, wurden auf Basis einer internationalen Literaturstudie über die bisher entwickelten Ansätze zur Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur ein geeignetes Verfahren zur Strukturcharakterisierung für die eigenen Untersuchungen ausgewählt und angepasst.

Unter Variation der Gesteinsart, der Asphaltgranulatzugabe und Additivzugabe wurden Varianten eines Splittmastixasphaltes und eines Asphaltbindermischguts im Labor hergestellt und Digitalbilder von den Querschnitten der Asphalt-Probekörper erfasst. Die Digitalbilder wurden einer digitalen Bildanalyse unterzogen und Indizes gewonnen, die es ermöglichten, die innere Asphaltstruktur hinreichend genau und zuverlässig abzubilden und quantitativ zu bewerten. Dabei wurden sowohl kontaktbasierte Strukturindizes (Anzahl an Gesteinskontakten, Summe der Kontaktlängen), sowie kontakt- und orientierungsbasierte Strukturindizes (Kontaktorientierungsverteilung, Summe der Widerstandskomponenten in Lastrichtung) berücksichtigt.

Um die Wirkungsmechanismen zwischen der inneren Asphaltstruktur und dem resultierenden Materialverhalten unter verschiedenen Randbedingungen zu untersuchen, wurden Gebrauchseigenschaften berücksichtigt, die im Zusammenhang mit Zug- wie auch Druckbelastung stehen. Daher wurde an den bildtechnisch analysierten Asphaltvarianten zum einen der Ermüdungswiderstand des Asphalts mittels Zug-Schwellversuch bestimmt. Zum anderen wurde der Verformungswiderstand mittels Triaxialprüfung angesprochen.

Die mittels Bilderfassung und -analyse gewonnenen Strukturindizes wurden mit den Parametern der unterschiedlichen Versagensmechanismen (Ermüdung, Verformung) auf mögliche statistisch signifikante Zusammenhänge untersucht.

Abschließend wurde an ausgewählten Asphaltvarianten die Asphaltmörtelviskosität mittels dynamischem Scherrheometer bestimmt, um einen möglichen Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf die resultierende innere Asphaltstruktur zu identifizieren.

6.3 Ergebnis und Ausblick

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse festhalten.

Es besteht insgesamt ein positiver, systematischer Zusammenhang zwischen der inneren Asphaltstruktur, charakterisiert durch die Strukturindizes und dem Ermüdungswiderstand des Asphalts, beurteilt anhand der Bruchlastwechselzahl bei +5 °C und -10 °C. Demnach zeigen Varianten mit einer stärker "verzahnten" inneren Asphaltstruktur (hohe Werte der Strukturindizes) im Vergleich zu Varianten mit einer weniger "verzahnten" inneren Asphaltstruktur (geringe Werte der Strukturindizes) einen größeren Ermüdungswiderstand.

In der Tendenz weisen die Strukturindizes des Asphaltskeletts im Vergleich zu jenen der Gesamtstruktur eine stärkere Korrelation zum Ermüdungswiderstand auf. Dies ist plausibel, da dem Asphaltskelett, definiert als inneres Gesteinsgerüst, die primäre lastabtragende Wirkung zugeschrieben wird, da zusammenhängende Gesteinskörner zur Lastabtragung beitragen und Gesteinskörnungen ohne jeglichen Kontaktpunkt vernachlässigbar sind. Unter den Strukturindizes üben die rein kontaktbasierten Parameter (Anzahl Gesteinskontakte, Summe Kontaktlängen) einen größeren Einfluss auf den Ermüdungswiderstand aus im Vergleich zu den kontakt- und orientierungsbasierten Parametern, wie die durchschnittliche Anisotropie der Kontaktorientierungsverteilung und die Summe der Widerstandskomponenten in Lastrichtung. Dies deutet darauf hin, dass für die Lastabtragung der in diesem Fall mit dem Zug-Schwellversuch induzierten Zugkräfte die Verzahnung der inneren Asphaltstruktur von größerer Bedeutung ist, als die jeweilige Orientierung der Gesteinskörner und der Gesteinskontakte.

Die Auswirkung der Druckbelastung aus der Triaxialprüfung auf die innere Asphaltstruktur am Versuchsende konnte plausibel nachgewiesen werden. Unter Eingrenzung der Stichproben besteht insgesamt ein positiver, systematischer Zusammenhang zwischen der inneren Asphaltstruktur, charakterisiert durch die Strukturindizes und die resultierende Asphaltstruktur. Demnach korrelieren hohe plastische Dehnungen mit hohen Werten der Strukturindizes. Folgerichtig weist ein Asphalt-Probekörper mit geringem Verformungswiderstand nach der Triaxialprüfung höhere plastische Dehnungen auf als ein Asphalt-Probekörper mit einem hohen Verformungswiderstand. Die Stauchung des Asphalt-Probekörpers durch die Druckbelastung kann als eine Art "Nachverdichtung" interpretiert werden, die beispielsweise zu einer Änderung der Gesteinsorientierung und im geringeren Maße zu einer Zunahme der Anzahl an Gesteinskontakten führt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Auswirkung der inneren Asphaltstruktur auf den resultierenden Verformungswiderstand lassen nur bedingt plausible Schlussfolgerungen zu. Ohne Stichprobenbegrenzung kann in der Korrelationsanalyse kein statistischer Zusammenhang zwischen den Strukturindizes der unbelasteten Asphaltstruktur und der resultierenden plastischen Dehnung nachgewiesen werden.

Weiterhin konnte kein systematischer Zusammenhang zwischen der Asphaltmörtelviskosität im Temperaturbereich von +60 °C bis +100 °C und der resultierenden inneren Asphaltstruktur erkannt werden.

Insgesamt kann auf Basis der Ergebnisse die ausgangs aufgestellte These, dass das Gebrauchsverhalten von Asphalt durch die „innere Struktur“ maßgeblich mitbestimmt wird, für den Ermüdungswiderstand und mit Einschränkungen für den Verformungswiderstand bestätigt werden. Dagegen kann die These, dass die Asphaltmörtelviskosität einen systematischen Einfluss auf die resultierende innere Asphaltstruktur ausübt, nicht bestätigt werden.

Eine Charakterisierung der inneren Asphaltstruktur ist durch die hier angewandten bildanalytischen Verfahren mit den entsprechenden Parametern möglich, wodurch interessante Ansatzpunkte zur Untersuchung des Einflusses der inneren Asphaltstruktur auf das Gebrauchsverhalten geschaffen wurden. Die 2 dimensional bildanalytischen Ansätze sind aus laborökonomischer Sicht sicherlich vorzuziehen, jedoch sind diese bezüglich der zerstörungsfreien Anwendung auf die äußeren Querschnitte der Asphalt-Probekörper begrenzt. Deshalb sind zukünftig Ansätze zu entwickeln, die eine zerstörungsfreie, 3 dimensionale Erfassung der inneren Asphaltstruktur bei einem vertretbaren Aufwand ermöglichen. Dadurch kann die Genauigkeit der Abbildung der Struktur verbessert und eine Optimierung der inneren Asphaltstruktur bezüglich der kraftabtragenden Wirkung ermöglicht werden.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zum Zusammenhang der Asphaltmörtelviskosität und der resultierenden inneren Asphaltstruktur waren auf Viskositätsbestimmungen im Temperaturbereich von +60 °C bis +100 °C beschränkt. Der Einbau und die Verdichtung des Asphalts, währenddessen sich die innere Asphaltstruktur im Wesentlichen ausbildet, beginnt jedoch bei noch höheren Temperaturen. Um abschließend die Frage nach einem möglichen Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf die resultierende innere Asphaltstruktur zu klären, sind daher weitere Untersuchungen zu empfehlen, die Asphaltmörtelviskositäten in einem höheren Temperaturbereich von +100 °C bis +150 °C berücksichtigen.

7 Literatur

- Abdul Hassan, N., Airey, G. D., and Hainin, M. R. 2014. Characterisation of micro-structural damage in asphalt mixtures using image analysis. *Construction and Building Materials*, Vol. 54, pp. 27-38.
- Adhikari, S., and You, Z. 2011. Investigating the Sensitivity of Aggregate Size within Sand Mastic by Modeling the Microstructure of an Asphalt Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, pp. 580-586.
- Adhikari, S., You, Z., and Peterson, K. 2013. Multi-Phase Characterization of Asphalt Concrete using X-ray Microfluorescence. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 6, pp. 117-122.
- Airey, G. D., Collop, A., Zoorob, S.E., Elliott, R.C. 2008. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 15-24.
- Alisov, A. 2017. Prüfsystematik zur Differenzierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie. Dissertation, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Aljassar, A. Metwali, S., Ali, M. 2005. Effect of filler types on Marshall stability and retained strength of asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering* 5(1), pp. 47-51.
- Alvarez, A. E., Epps Martin, A., and Estakhri, C. 2010. Internal structure of compacted permeable friction course mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1027-1035.
- Anderson, D. A., Bahia, H. U. and Dongre, R. 1992. Rheological Properties of Mineral Filler-Asphalt Mastics and Its Importance to Pavement Performance. Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. ASTM STP 1147, Meininger, R. C. (Ed.), ASTM, Philadelphia, Pa.
- Anderson, D. A., Christensen, D. W., Bahia, H. U., Dongre, R., Sharma, M. G., Antle, C. E., and Button, J. 1994. Binder Characterization and Evaluation, Volume 3: Physical Characterization, SHRP-A-369, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Anderson, D. A. 1996. Influence of fines on performance of asphalt concrete mixtures. Proceedings of the fourth annual aggregates symposium, Atlanta, USA.
- Arand, W. 1971. Der bituminöse Mörtel, Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe 7/1971.
- Arand, W., und Renken, P. 1980. Verdichtungswilligkeit von Asphaltgemischen - Definition, Bestimmung der Einflußgrößen, Quantifizierung des Einflusses. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 296, Bonn-Bad Godesberg.
- Arand, W.; und Kiekenap, P. 1981. Fließindex - Entwicklung und Erprobung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung der stabilisierenden Wirkung von Sanden. Schlussbericht zum FA 7.084 G. 79 E des Bundesministers für Verkehr, Braunschweig.
- ARBIT, 2013. Dynamischer Scherrheometer. Ein Prüfgerät, viele Möglichkeiten. Bitumen!, Vol. 1, Arbeitsgemeinschaft der Bitumenindustrie e.V., Hamburg.
- Bahia, H. U., Golalipour, A., and Coenen, A. R. 2012. Comparing Effects of Crumb Rubber and Synthetic Polymers on Hot Mix Asphalt Performance. Proc., Asphalt Rubber Conference, pp. 1-26, Oct. 1-3, 2012, Munich, Deutschland.

- Bahia, H. U., and Roohi Sefidmazgi, N. 2013. Effect of Compaction Method, Temperature and Pressure on Aggregate Structure of Hot Mix Asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Braz, D., da Motta, L. M., and Lopes, R. T. (1999). Computed tomography in the fatigue test analysis of an asphaltic mixture. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 50, pp. 661-671.
- Bruno, L., Parla, G., Celauro, C. 2012. Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar images. *Construction and Building Materials*, Vol. 28, pp.21-30.
- Brzezicki, J.M., and Kasperkiewicz, J. 1999. Automatic Image Analysis in Evaluation of Aggregate Shape. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 13, pp. 123-128.
- Büchler, S. 2010. Rheologisches Modell zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Asphalten. *Schriftreihe Straßenwesen*, Heft 24, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Campen, W. H., and Smith, J. R. 1948. A Study of the Role Of Angular Aggregate in the Development of Stability in Bituminous Mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, Vol. 17, pp. 114-143.
- Cannone Falchetto, A., Moon, K. H., Wistuba, M. 2014. Microstructural analysis and rheological modeling of asphalt mixtures containing recycled asphalt materials. *Materials*, Vol. 7, No. 9, pp. 6254-6280.
- Canny, J. 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), pp. 679–698.
- Cates, M. E., Wittmer, J. P., Bouchaud, J.-P. and Claudin, P. 1998. Jamming, force chains, and fragile matter, *Phys. Rev. Letters*, Vol. 81, Issue 1841.
- Chandan, C., Sivakumar, K., Massad, E., Fletscher, T. 2004. Application of Imaging Techniques to Geometry Analysis of Aggregate Particles, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 75-82.
- Christensen, D., Hanz, A., Velasquez, R., Arshadi, A., and Bahia, H. U. 2014. Refinement of Current WisDOT HMA Mixture App Guidelines Related to NMAS and Aggregate Characteristics. Final report, Wisconsin Highway Research Program 0092-12-01 by order of the Wisconsin Department of Transportation, Advanced Asphalt Technologies, Sterling, Virginia.
- Coenen A. 2011 Image Analysis of Aggregate Structure Parameters as Performance Indicators of Rutting Resistance, PhD thesis, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin.
- Coenen, A., Kutay, M. E., Bahia, H. U. 2012. Aggregate Structure Characterization of Asphalt Mixtures Using 2-Dimensional Image Analysis, *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 13, pp. 433-454.
- Delaporte B., Di Benedetto, H., Chaverot, P., Gauthier, G. 2007. Linear viscoelastic properties of bituminous materials: from binders to mastics. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 76, pp. 455–494.
- Deriche, R. 1990. Fast algorithms for low-level vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12, pp.78–87.
- DIN, 1994. Linear-viskoelastische Stoffe. Begriffe, Stoffgesetze, Grundfunktionen. DIN 13343. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN. 2005. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 5: Bestimmung des Anteils an gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen. DIN EN 933-5, Ausgabe 2005. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin.

- DIN. 2012. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen. DIN EN 12697-46, Ausgabe 2012. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN. 2013. Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 25: Druckschwellversuch. DIN EN 12697-25, Ausgabe 2013. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin.
- Edwards, S. F., and Oakeshott, R. B. S. 1989. The transmission of stress in an aggregate. *Physica D*, Vol. 38, pp. 88-89.
- Einstein, A. 1906. Eine neue Bestimmung der Molekulardimensionen. *Annalen der Physik* 19.
- Erhardt, A. 2008. Einführung in die Digitale Bildverarbeitung – Grundlagen, Systeme und Anwendungen. Vieweg+Teuber Verlag, Wiesbaden.
- Ewers, J. W. und Heukelom, W. 1964. Die Erhöhung der Viskosität von Bitumen durch die Zugabe von Füller. *Straße und Autobahn* 15(2), S. 31-39.
- Fabbi, P. 1972. A Refine Tusion X-ray Fluorescenoe Technique, and Determination of Mayor and Minor Elements in Silicate Standards. *American Mineralogist*, Vol. 57, pp 237-245.
- Feix, R. 1979. Untersuchungen von Sanden auf zur Ermittlung der auf die Qualität bituminöser Mörtel wirksamen Einflussfaktoren. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 275, Bonn.
- Fernlund, J. M. R. 2005. 3-D image analysis size and shape method applied to the evaluation of the Los Angeles test. *Engineering Geology*, Vol. 77, pp. 57-67.
- FGSV. 2007. Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau, Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät. Ausgabe 2007. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV-Verlag, Köln.
- Fletcher, T. 2002. Aggregate imaging system for characterizing fine and coarse aggregate shape. Master's thesls, Dept. of Clvil and Environmental Engineering, Washington State Univ., Pullman, Washington D. C.
- FSV, 2010. RVS 08.97.05. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen. Technische Vertragsbedingungen Baustoffe, Anforderungen an Asphaltmischgut, Ausgabe 2. Februar 2010. Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, FSV-Verlag, Wien.
- Gonell, W. 1934a. Gesteinsmehle als Füller im Bitumenstraßenbau. *Bitumen* 4(3), S. 66-69; (4), S.93-98.
- Gonell, W. 1934b. Über die Oberflächenentwicklung von Füllern. *Öl und Kohle* 2(8), S. 370-374.
- Graf, K., Vassiliou, K. 2007. Auswirkungen der Eigenschaften von Sand und Füller auf den Mörtel von Walzasphalt (Splittmastixasphalt/ Asphaltbeton), *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 964, Bonn.
- Gubler, R., Liu, Y., Anderson, D., Partl, M. 1999. Investigation of the system filler and asphalt binders by rheological means. *Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 68(2), pp. 284-304.
- Hamzah, M. O., Von, E. C., and Abdullah, N. H. 2013. Effects of Compactor Types on Aggregate Orientation of Asphalt Mixtures. *International Journal of Engineering*, Vol. 26, pp. 677-684.
- Harris, B. M., and Stuart, K. D. 1995. Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 64, pp.54-95.

- Hesami, E., Jelagin, D., Birgisson, B., Kringos, N. 2012. Towards a New Experimental and Numerical Protocol for Determining Mastic Viscosity. In: Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I., Loizos, A. (Eds.), 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. RILEM Bookseries, Vol. 4, pp. 103–114. Springer, Heidelberg.
- Holl, A. 1963. Über die Wirkungsweise des Füllers in Bitumen-Mineral-Gemischen. Bitumen, Teere, Asphate, Peche 14(4), S. 188-194.
- Holl, A. 1965. Einfluß der Kornform auf die Dichtigkeitsgrade von Kornhaufwerken unter besonderer Berücksichtigung bituminous gebundener Mineralgemische. Dissertation TH Darmstadt D17.
- Horne, R. 1965. The behaviour of an assembly of rotund, rigid cohesionless particles I-II. Proc. R. Soc. London A, Vol. 286, pp. 62-97.
- Ishai, I., and Gellber, H. 1982. Effect of Geometric Irregularity of Aggregates on the Properties and Behavior of Asphalt Concrete. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 51, pp. 494-521.
- Jähne, B. 2012. Digitale Bildverarbeitung und Gewinnung. 7. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Janoo, V. C. 1998. Quantification of Shape, Angularity. and Surface Texture of Base Course Materials. Special Report 98-1. Cold Regions Research & Engineering Laboratory. U.S. Army Corps of Engineers.
- Kalcheff, I. V., and Tunnicliff, D. G. 1982. Effect of Crushed Stone Size and Shape on Properties Of Asphalt Concrete. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 51, pp. 453-470.
- Kandhal, P. S., Motter, J. B., and Khatri, M. A. 1991. Evaluation of Particle Shape and Texture: Manufactured Versus Natural Sands. Transportation Research Record 1301, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp. 48-67.
- Kandhal, P. S., Lynn, C.Y., and Parker, F. 1998. Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures. NCAT Report 98-02. National Center for Asphalt Technology (NCAT)-Auburn University.
- Kim, H., Haas, C. T., Rauch, A. F., and Browne, C. 2000. Innovative system for scanning construction aggregates using laser profiling. Proc., 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 3-7, Sep. 18-20, 2000, Taipei, Taiwan.
- Kim, V. R., Little, D. N., and Song, I. 2003. Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. Transportation Research Record: Transportation Research Board, No. 1832. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 1-8.
- Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T., Schehl, J. 2010. Statistik. Eine verständliche Einführung. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Springer, Wiesbaden.
- Kuo, C.-Y., Rollings, R. S., Lynch, L. N. 1998. Morphological Study of Coarse Aggregates Using Image Analysis. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 10, pp. 135-142.
- Lackner, R., Blab, R., Jäger, A., Spiegl, M., Kappl, K., Wistuba, M., Gagliano, B., and Eberhardsteiner, J. 2004. Multiscale modeling as the basis for reliable predictions of the behavior of multi-composed materials. Progress in Engineering Computational Technology, Saxe-Coburg Publications, ISBN 1-874672-22-9.

- Lakes, R. S., Kose, S., and Bahia, H. U. 2002. Analysis of High Volume Fraction Irregular Particulate Damping Composites. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 124, pp. 174-178.
- Lange, M. 1999. Regionenbasierte Segmentierungsverfahren für dreidimensionale biomedizinische Bilddaten. Diplomarbeit, Arbeitsgruppe Algorithmische und Diskrete Mathematik, TU Berlin.
- Lanser, S., Eckstein, W. 1991. Eine Modifikation des Deriche-Verfahrens zur Kantendetektion. Radig, B. (Hrsg.), *Mustererkennung 1991*, Informatik Fachberichte, Bd. 290, S. 151–158. 13. DAGM Symposium, München, Springer, Berlin.
- Lee, J. R. J., Smith, M. L., Smith, L. N. 2007. A new approach to the three-dimensional quantification of angularity using image analysis of the size and form of coarse aggregates. *Engineering Geology*, Vol. 91, pp. 254-264.
- Lefebure, J. 1957. Recent Investigations of Design of Asphalt Paving Mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, Vol. 26, pp. 321-394.
- Liao, M., Airey, G., Chen, J. 2013. Mechanical Properties of Filler-Asphalt Mastics. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 6, No. 5, pp. 576-581.
- Lorenz, D. 1985. *Das Stereobild in Wissenschaft und Technik*. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Köln, Oberpfaffenhofen.
- Lottman, R. R., and W. H. Goetz. 1956. Effect of Crushed Gravel Fine Aggregate on the Strength of Asphaltic Surfacing Mixtures. *National Sand Gravel Association Circular*, Vol. 63.
- Maerz, N. H. 2004. Technical and Computational Aspects of the Measurement of Aggregate Shape by Digital Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 18, pp. 10-18.
- Marr, D. 1982. *Vision*. W. H. Freeman and Company, New York.
- Marr, D., Hildreth E. C. 1980. Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 207, No. 1167, pp.187-217.
- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N., and Harman, T. 1999. Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 13, pp. 88-95.
- Masad, E., and Button, J. W. 2000. Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, pp. 273-280.
- Masad, E. 2001. Review of imaging techniques for characterizing the shape of aggregates used in asphalt mixes. *Proc., International Center for Aggregates Research 9th Annual Symposium 2001: Aggregates - Concrete, Bases and Fines*, pp. 1-29, Apr. 22-25, 2001, Austin, Texas, USA.
- Masad, E., Olcott, D., White, T., Tashman, L., 2001a. Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance. *Transportation Research Record*, Vol. 1757, pp. 148-156.
- Masad, E., Somadevan, N., Bahia, H. U., and Kose, S. 2001b. Modeling and Experimental Measurements of Strain Distribution in Asphalt Mixes. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127, pp. 477-485.

- Masad, E., Jandhyala, V. K., Dasgupta, N., Somadevan, N., and Shashidhar, N. 2002a. Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes using X-ray Computed Tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, pp. 122-129.
- Masad, E., Tashman, L., Somedavan, N., and Little, D. 2002b. Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, pp. 374-383.
- Masad, E. 2003. The Development of A Computer Controlled Image Analysis System for Measuring Aggregate Shape Properties. NCHRP-IDEA Project 77 Final Report, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Masad, E., Little, D., and Sukhwani, R. 2004. Sensitivity of HMA performance to aggregate shape measured using conventional and image analysis methods. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 5, pp. 477-498.
- Masad, E., Tashman, L., Little, D., Zbib, H. 2005. Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics. *Mechanics of Materials*, Vol. 37, pp. 1242-1256.
- Masad, E., Al-Rousan, T., Bathina, M., McGahan, J., and Spiegelman, C. 2007. Analysis of Aggregate Shape Characteristics and its Relationship to Hot Mix Asphalt Performance. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 8, pp. 317-350.
- Masad, E., and Kutay, M. E. 2012. Characterization of the Internal Structure of Asphalt Mixtures. *Transport Research Circular E-C161*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 2-16.
- Mather, B. 1966. Shape, Surface Texture, and Coating, Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. STP 169.A.ASTM. Philadelphia., Pa., pp. 415-441.
- Mezger, T. G. 2012. *Das Rheologie Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. 4. Auflage, Vincentz Network GmbH, Hannover.
- Mora, C. F., and Kwan, A. K. 2000. Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 351-358.
- Montepara, A, Romeo, E., Isola, M., Tebaldi, G. 2011. The role of fillers on cracking behavior of mastics and asphalt mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Florida.
- Neumann, E. 1929. Die Bedeutung und der Einfluß des geringsten Hohlraumgehaltes bei Asphalt und Teermischungen *Jahrbuch für den Straßenbau*, Pflaum-Verlag, München/Berlin.
- o. A., 05.04.2016. Prinzip der Röntgentomographie. <http://www.imp.uni-hannover.de/rntgentomographiecomputertom.html>.
- o. A., 06.04.2016. Chain of transmission of stress forces in a granular media https://en.wikipedia.org/wiki/Force_chain.
- Persson, A. L. 1998. Image analysis of shape and size of fine aggregates. *Engineering Geology*, Vol. 50, pp. 177-186.
- Pöbel, R. 1929. *Der moderne Asphaltstraßenbau*. Straßenbau-Verlag Boerner, Halle/Saale.
- Prowell, B. Zhang, J, Brown, E. 2005. Aggregate properties and the performance of super-pave-designed hot mix asphalt. NCHRP Report 539. National Cooperative Highway Research Program-Transportation Research Board, Washington, D.C.

- Rehbinder, P. A., Michajlow, N. W. 1961. Strukturbildung in dispersen und hochmolekularen Systemen, Strukturtypen und ihre rheologischen Eigenschaften. *Rheologica Acta*, Band 1, Nr. 4, S. 361-370.
- Reiner, M. 1969. *Rheologie in elementarer Darstellung*. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München.
- Research Systems, Inc. 2004. *ENVI User's Guide*.
- Rigden, P. J. 1954. The Rheology of Non-Aqueous Suspensions. Road Research Technical Paper No. 28, Road Research Laboratory, Harmondsworth.
- Ringleb, A. / Herzberg, B. 2012. Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs / Einfluss der Mischgutherstellung im Labor auf die resultierenden Asphalteeigenschaften. *Schriftenreihe Straßenwesen*, Heft 25, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Romero, P., Masad, E. 2001. Relationship between the Representative Volume Element and Mechanical Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 13, pp. 77-84.
- Roohi Sefidmazgi, N., Tashman, L., and Bahia, H. U. 2012. Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 13, pp. 21-37.
- Roohi Sefidmazgi, N., and Bahia, H. U. 2014. Effect of compaction conditions on aggregate packing using 2-dimensional image analysis and the relation to performance of HMA. *Materials and Structures*, Vol. 47, pp. 1313-1324.
- Roohi Sefidmazgi, N., and Bahia, H. U. 2016. Mechanisms of Failure in Uniaxial Repeated Creep Test and the Relationship to Aggregate Packing. Canenstrari, F. and Partl M.,N. (Eds). 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, RILEM Bookseries 11, Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London.
- Ruck, R. 1962. Stand der Untersuchungen von Füllern und Füller-Bitumen-Gemischen im In- und Ausland. *Bitumen* 24(9), S. 226-238.
- Saheen, M., Al-Mayah, A., Tighe, S. 2015. Visualization and Quantification of Hot Mix Asphalt Characteristics using X-Ray Computed Tomography. *Proc. of the Sixtieth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*, pp. 245-262, 15.-18 November, 2015, Ottawa, Ontario, Canada.
- Schindler, A. 1939. Die Füllerverwertung im bituminösen Straßenbau. *Straße und Verkehr* 25(10/11), S. 174-176.
- Schuhbauer, A. 1966. Die Eigenschaften von Füllern in bituminösen Massen. *Bitumen, Teere, Asphalte, Peche und verwandte Stoffe* 19(9), S. 240-245.
- Selvadurai, A. P. S., Au, M. C., and Phang, W. A. 1990. Modelling of low temperature behaviour of cracks in asphalt pavement structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, pp. 844-858.
- Shenoy, A. , Stuart, K., and Mogawer, W. 2003. Do Asphalt Mixtures Correlate Better with Mastics or Binders in Evaluating Permanent Deformation? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1829, Transportation Research Board of the National Academies, Washington. D.C., pp. 16-25.
- Shklarsky, E., and M. Liffie. 1964. The Use of Gravels for Bituminous Mixtures. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologies*, Vol. 33, pp. 584-610.

- Sun, Q., Jin, F., Liu, J., and Zhang, G. 2010. Understanding force chains in dense granular materials. *Int. J. Modern Phys. B*, Vol. 24(29), pp. 5743-5759.
- Suss, G. 1971. Der Einfluß der Korngröße auf das Verformungsverhalten von Füller-Bitumen-Gemischen. Dissertation, Fachbereich Wasser und Verkehr, TH Darmstadt.
- Steinhoff, G. 1977. Mischarbeit und Verarbeitbarkeit von Asphaltmörtel und Mastix in Abhängigkeit von der Füllerart. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Straßenwesen und Erdbau, Technische Universität Braunschweig.
- Steinmüller, J. 2008. Bildanalyse - Von der Bildverarbeitung zur räumlichen Interpretation von Bildern. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Tashman, L., Masad, E., Little, D., and Zbib, H. 2005. A microstructure-based viscoplastic model for asphalt concrete. *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, pp. 1659-1685.
- Tashman, L., Wang, L., and Thyagarajan, S. 2007. Microstructure Characterization for Modeling HMA Behaviour using Imaging Technology. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 8, pp. 207-238.
- Teymourpour, P., and Bahia, H. U. 2014. Effects of binder modifications on aggregate structure and thermovolumetric properties of asphalt mixtures. *Asphalt Materials and Mixtures*, Vol. 2, pp. 21-28.
- Wagner, K. 1974. Untersuchung der Eigenschaften mineralischer Flugaschen und Beurteilung ihres Verhaltens im bituminösen Mischgut. Dissertation, Fakultät für Bauwesen, TH Aachen.
- Wang, H., and Hao, P. 2011. Numerical Simulation of Indirect Tensile Test Based on the Microstructure of Asphalt Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, pp. 21-29.
- Wichert, P. 1929. Über die stabilisierenden Einflüsse von künstlichen und natürlichen Füllerbeimengungen auf Bitumen. Dissertation, TH Berlin.
- Wilhelmi, R. 1933. Neue Wege für den Aufbau von Asphalt und Teerdecken. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Straßenbau*, TH Stuttgart, H 7 Angern, Industrie -Verlag, Berlin.
- Wiskow, B. 2014. Charakterisierung der Asphaltstruktur mittels Digitalbildanalyse. Studienarbeit, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Wiskow, B. 2015. Bildtechnische Charakterisierung der Asphaltstruktur und Einfluss auf den Ermüdungswiderstand von Asphalt. Masterarbeit, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.
- Yue, Z. Q., Bekking, W. and Morin, I. 1995. Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure. *Transportation Research Record*, Vol. 1492, pp. 53-60.
- Yue, Z. Q., and Morin, I. 1996. Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, pp. 480-489.
- You, Z., and Dai, Q. 2007. Review of advances in micromechanical modeling of aggregate-aggregate interactions in asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, pp. 239-252.
- You, Z., Adhikari, S., and Dai, Q. 2008. Three-Dimensional Discrete Element Models for Asphalt Mixtures. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 134, pp. 1053-1063.
- Zeilew, H. M., Papagiannakis, A. T., and Masad, E. 2008. Application of digital image processing techniques for asphalt concrete mixture images. *Proc., The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, pp. 119-124, Oct. 1-6, Goa, India.

Zeleeuw, H. M., Papagiannakis, A. T. 2011. A volumetrics thresholding algorithm for processing asphalt concrete X-ray CT images. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 12, pp. 543-551.

Zhang, J., Yang, J. 2013. Advances in micromechanical constitutive theories and modeling in asphalt mixture: A review. *Proc., 13th COTA International Conference of Transportation Professionals*, pp. 1304-1314, Aug. 13-16, Shenzhen, China.

Zhu, H., and Nodes, J. 2000. Contact based analysis of asphalt pavement with the effect of aggregate angularity. *Mechanics of Materials*, Vol. 32, pp.193-202.

8 Anhang

(a) Bestimmung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson und des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearmann (Kuckartz et al., 2010)

Im Rahmen der statistischen Analyse zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen innerer Asphaltstruktur und den ausgewählten Asphalteigenschaften wurden lineare Regressionen zwischen den Variablen durchgeführt. Die Stärke des Zusammenhangs ergibt sich aus der Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson (Pearson r) wie folgt:

$$\text{Pearson } r = \frac{\text{cov}(x, y)}{s_x \cdot s_y}$$

mit:

cov(x, y): Kovarianz der Variablen x und y [-],

s_x : Standardabweichungen der Variablen x und y

und

$$\text{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{n - 1}$$

mit:

x_i und y_i : Wert der Variable x und der Variable y,

\bar{x} und \bar{y} : Mittelwerte der Variablen x und y,

n: Anzahl der Einzelwerte.

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Die Stärke des Zusammenhangs lässt sich wie folgt beurteilen:

Betrag von Pearson r	Stärke des Zusammenhangs
0	Keine Korrelation
0 bis 0,2	Sehr schwache Korrelation
0,2 bis 0,4	Schwache Korrelation
0,4 bis 0,6	Mittlere Korrelation
0,6 bis 0,8	Starke Korrelation
0,8 bis 1,0	Sehr starke Korrelation
1,0	Perfekte Korrelation

Die Signifikanz des Zusammenhangs wurde mittels einfachem t-Test über die Prüfgröße t bestimmt:

$$\text{Prüfgröße } t (\text{Pearson-Korrelation}) = \frac{r \cdot \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}}$$

mit:

r: ermittelter Korrelationskoeffizient nach Pearson,

n: Anzahl der Einzelwerte.

Sofern die Prüfgröße $t < \text{kritischer Wert}$ aus der t-Verteilungstabelle ist, kann die Nullhypothese (signifikanter Zusammenhang zwischen den Variablen) angenommen werden. Es wurde

auf einem Signifikanzniveau (Irrtumswahrscheinlichkeit) von 5 % überprüft. Hoch signifikante Korrelationen weisen eine Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1\%$, signifikante Korrelationen eine Irrtumswahrscheinlichkeit $< 5\%$ auf. Korrelationen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit über 5% werden als nicht signifikant eingestuft.

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson reagiert auf Ausreißer sensibel, da in diesen die Höhe des jeweiligen Einzelwertes direkt einfließt. Um den Zusammenhang zwischen innerer Asphaltstruktur und den ausgewählten Asphalteigenschaften robuster gegenüber Ausreißern beurteilen zu können wurde zusätzlich der Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman (r_s) wie folgt bestimmt:

$$r_s = \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)}$$

mit:

d_i^2 : quadrierte Rangplatzdifferenz des i-ten Einzelwertes,

n: Anzahl der Einzelwerte.

Der Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman ist robuster gegenüber Ausreißern, da nur die Reihenfolge der Einzelwerte und nicht deren Höhe berücksichtigt wird. Die Beurteilung der Stärke des Zusammenhangs erfolgte in Analogie zur Beurteilung bei der Pearson-Korrelation (siehe oben).

Die Signifikanz des Zusammenhangs nach Spearman wurde mittels t-Test über die Prüfgröße t und einem Signifikanzniveau von 5 % bestimmt:

$$\text{Prüfgröße } t \text{ (Spearman-Korrelation)} = \frac{r_s}{\sqrt{1 - r_s^2} \sqrt{n - 2}}$$

mit:

r_s : ermittelter Korrelationskoeffizient nach Spearman,

n: Anzahl der Einzelwerte.

Die Werte von Pearson und Spearman wurden verglichen und bei einem eindeutigen Unterschied zwischen beiden Werten der Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman als maßgebend für die Beurteilung der Stärke des betrachteten Zusammenhangs erachtet.

(b) Ergebnisse der Korrelationsanalysen zum Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf den komplexen Schermodul G^* und zugehörigem Phasenwinkel δ bei einer Temperatur von $+60\text{ °C}$

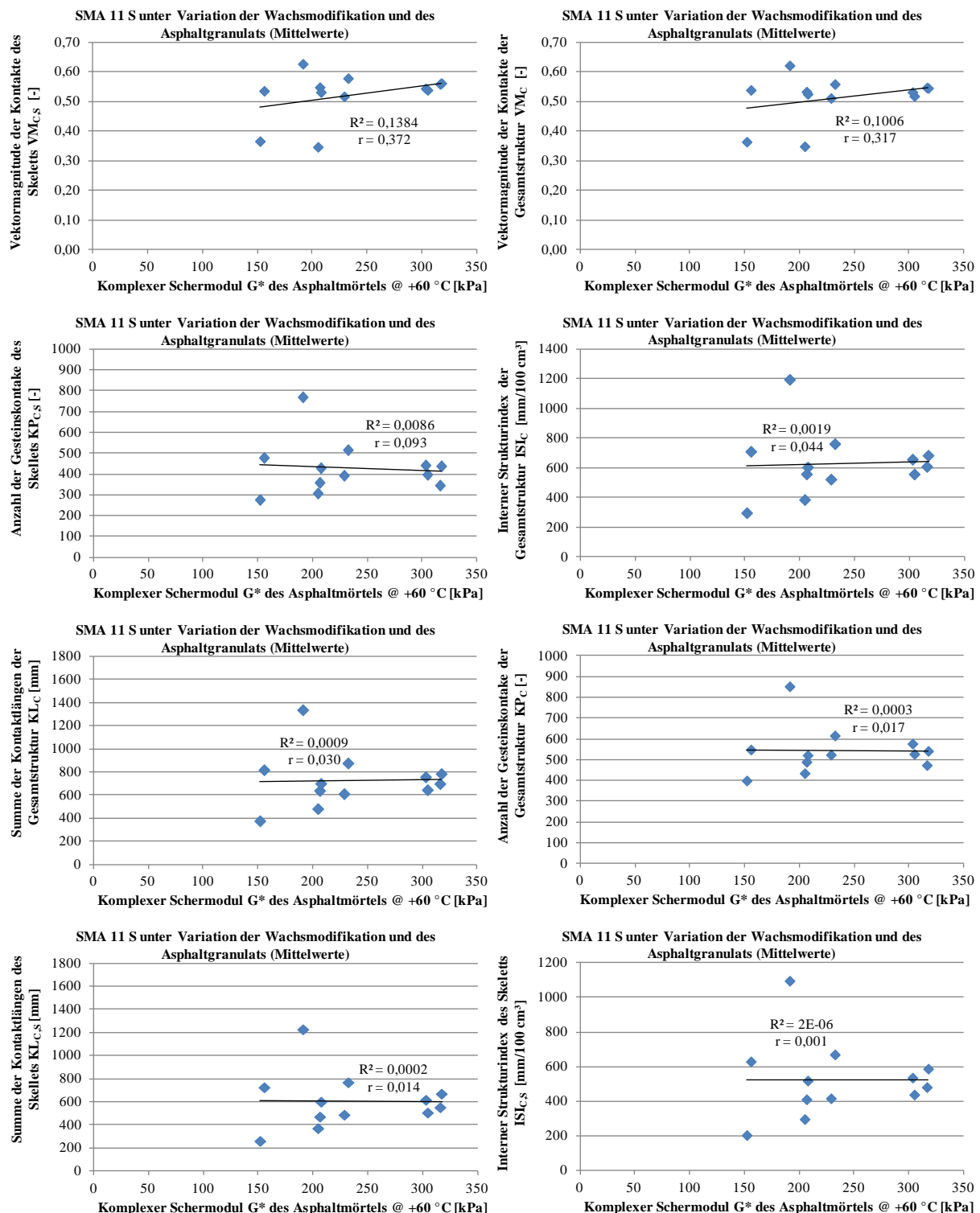


Abbildung 74. Korrelationen zwischen dem komplexen Schermodul G^* des Asphaltmörtels bei $+60\text{ °C}$ und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

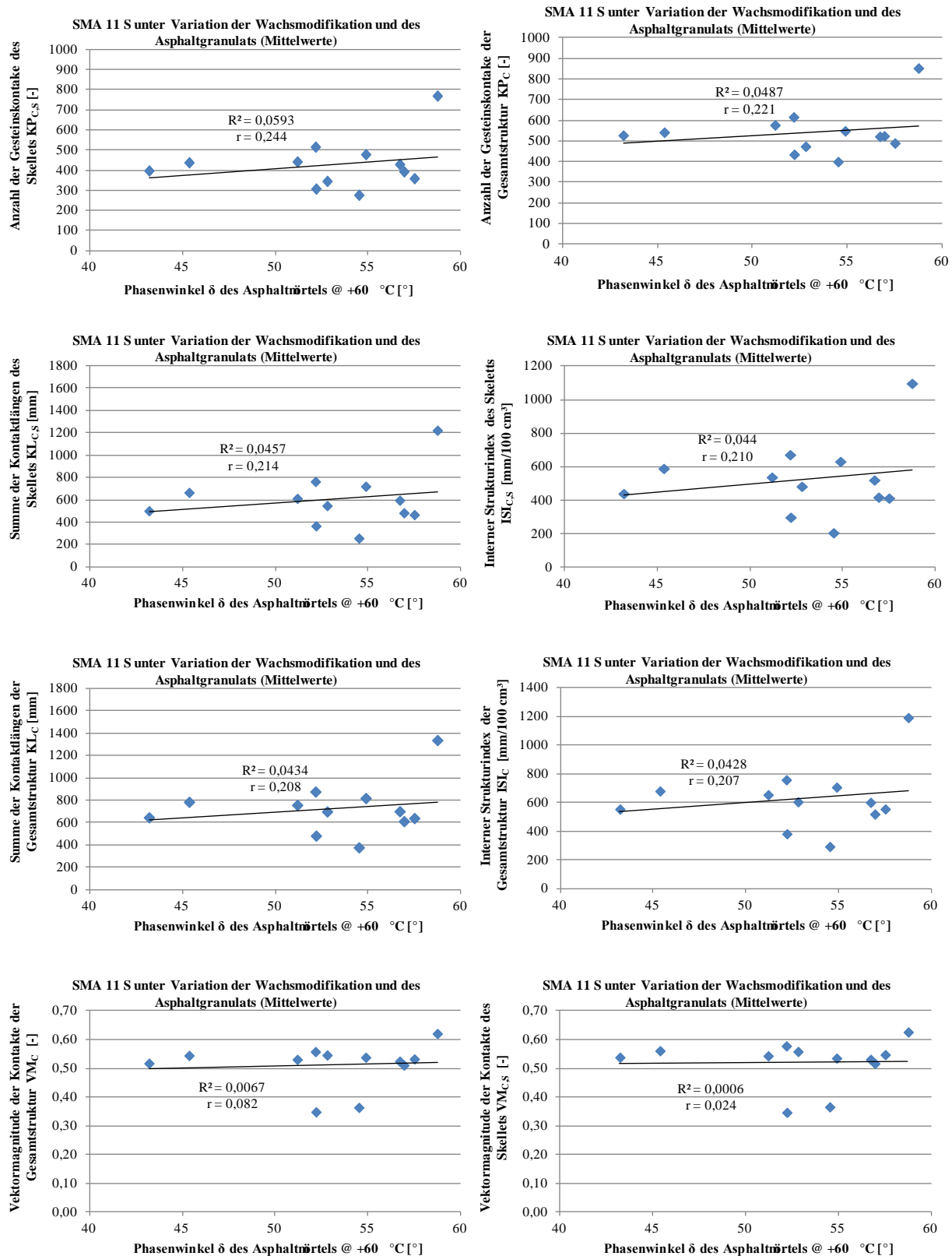


Abbildung 75. Korrelationen zwischen dem Phasenwinkel δ des Asphaltmörtels bei +60 °C und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

(c) Ergebnisse der Korrelationsanalysen zum Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf den komplexen Schermodul G^* und zugehörigem Phasenwinkel δ bei einer Temperatur von $+80^\circ\text{C}$

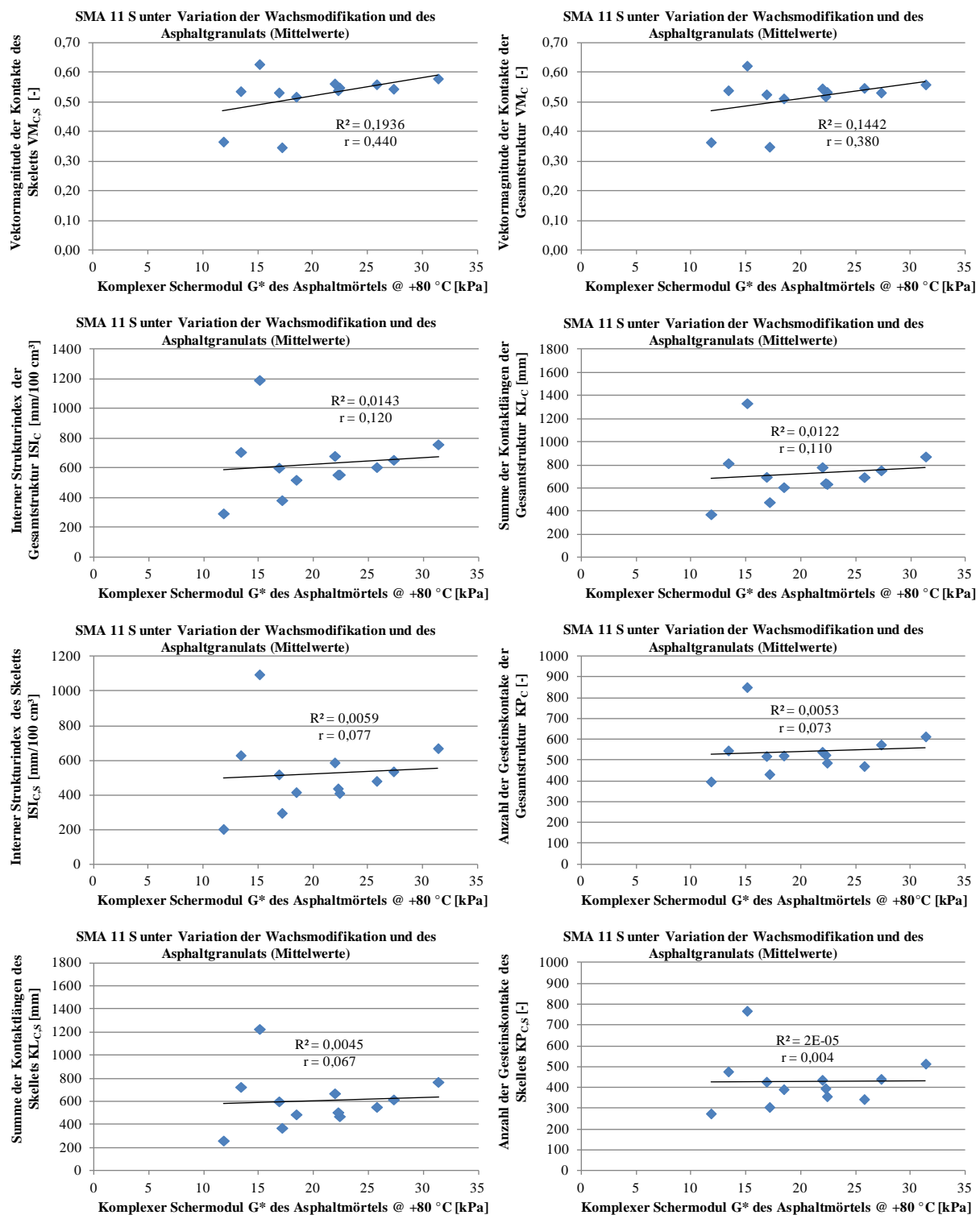


Abbildung 76. Korrelationen zwischen dem komplexen Schermodul G^* des Asphaltmörtels bei $+80^\circ\text{C}$ und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

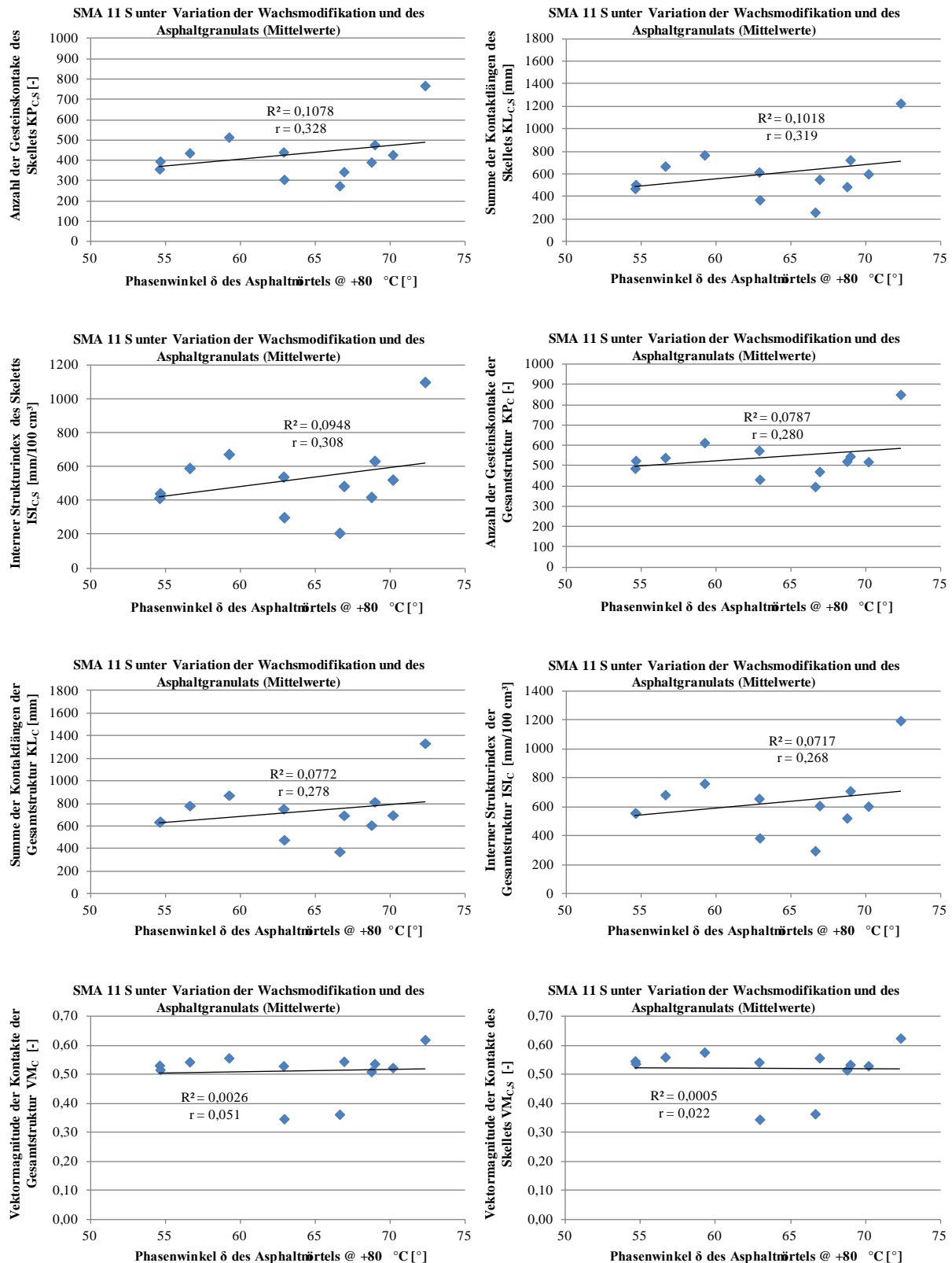


Abbildung 77. Korrelationen zwischen dem Phasenwinkel δ des Asphaltmörtels bei +80 °C und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

(d) Ergebnisse der Korrelationsanalysen zum Einfluss der Asphaltmörtelviskosität auf den komplexen Schermodul G^* und zugehörigem Phasenwinkel δ bei einer Temperatur von $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$

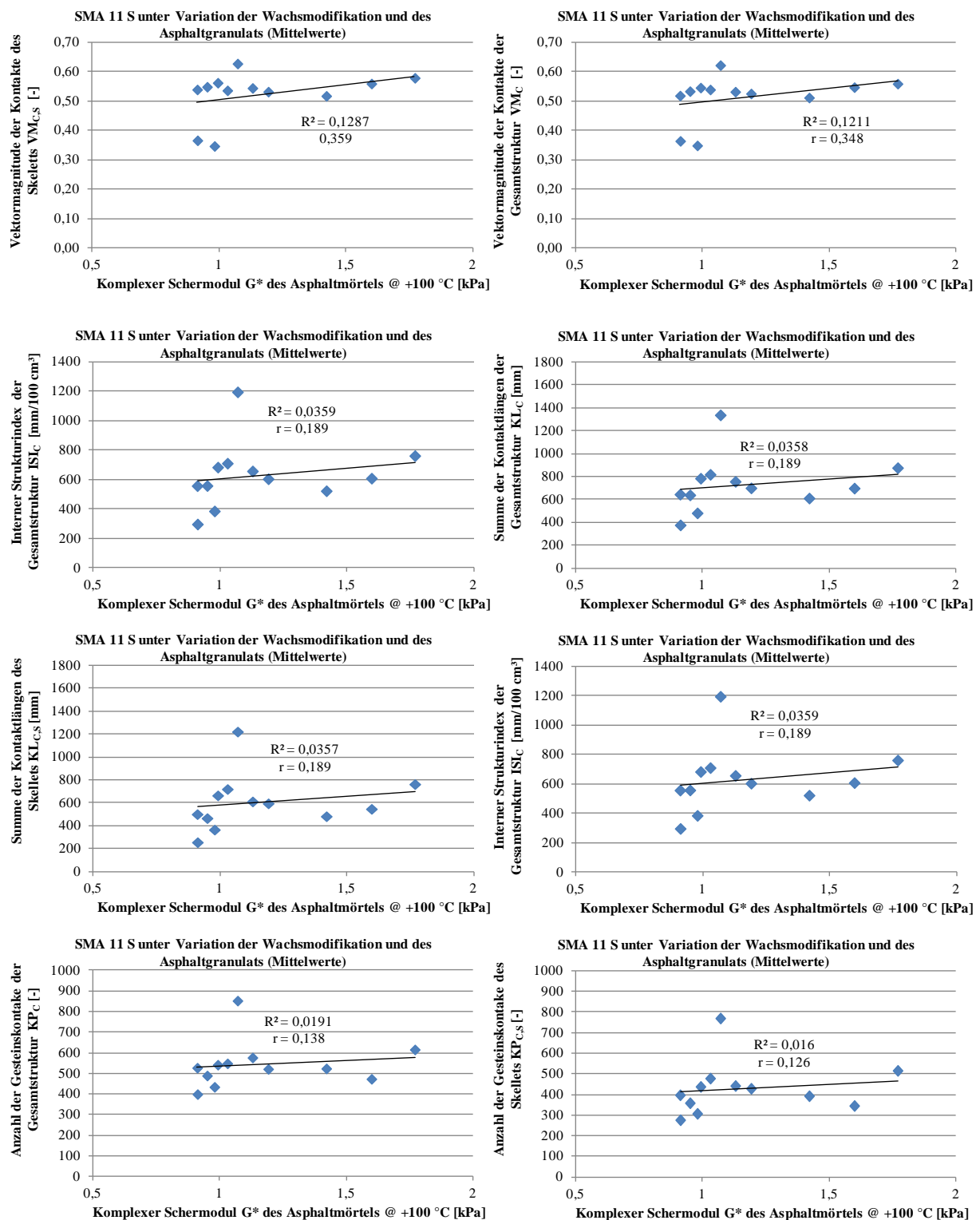


Abbildung 78. Korrelationen zwischen dem komplexen Schermodul G^* des Asphaltmörtels bei $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ und der Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

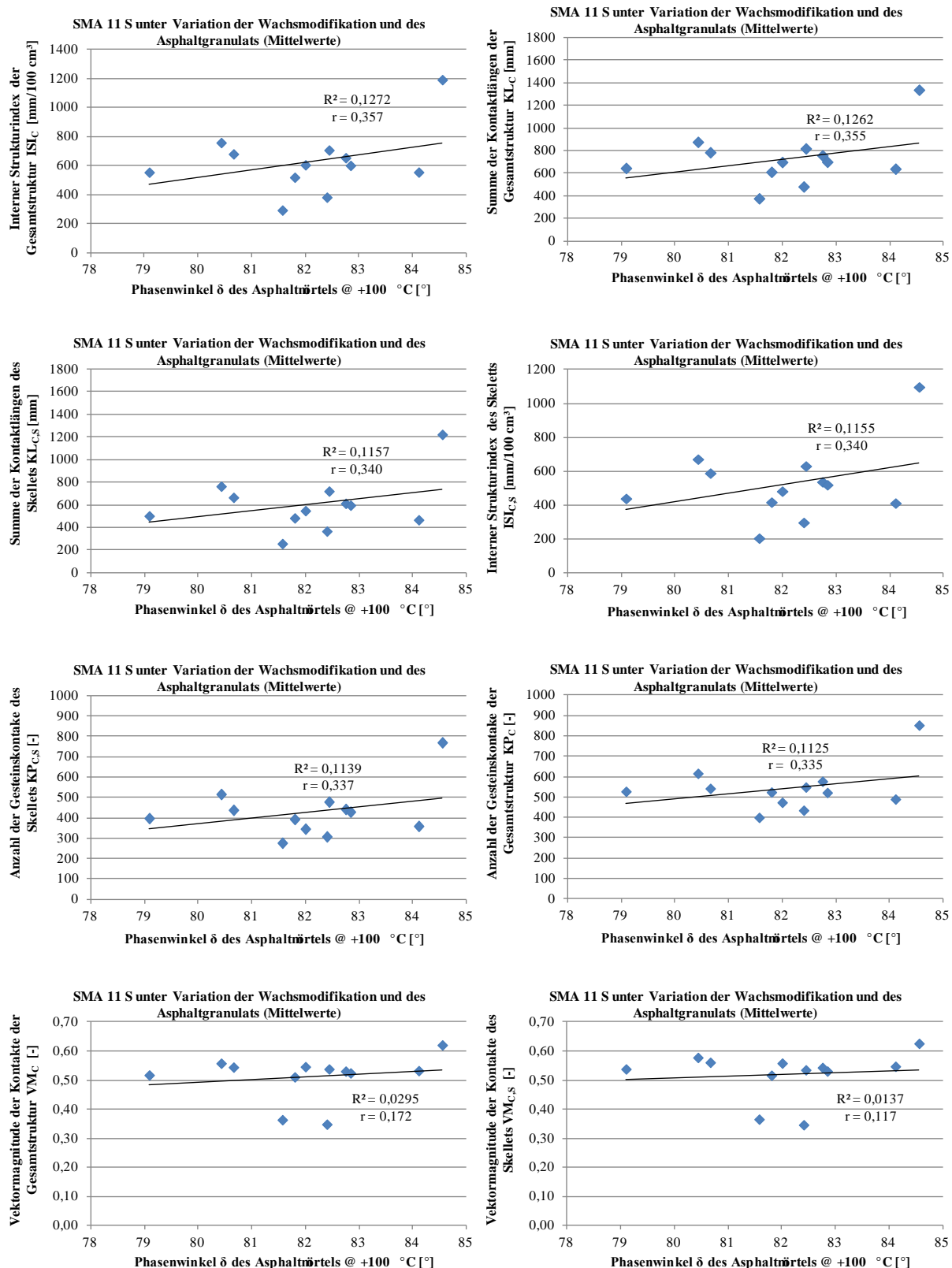


Abbildung 79. Korrelationen zwischen dem Phasenwinkel δ des Asphaltmörtels bei +100 °C und den Strukturindizes der Asphalt-Probekörper unter Einbeziehung der Einzelwerte der Zug-Schwellprüfungen.

Verzeichnis der ISBS Schriftenreihe

- Heft 1: Gerd Steinhoff
Mischarbeit und Verarbeitbarkeit von Asphaltmörtel und Mastix in Abhängigkeit von der Füllstoffart; 1977
- Heft 2: Planung und Ausführung von Infrastrukturmaßnahmen in Ländern der Dritten Welt, Seminarbeiträge; 1978
- Heft 3: Peter Renken
Verdichtbarkeit von Asphaltbetongemischen und ihr Einfluß auf die Standfestigkeit; 1980
- Heft 4: Hans-Jürgen Collin
Determinanten des sonntäglichen Freizeitverkehrs für ausgesuchte Aktivitäten; 1980
- Heft 5: Freizeitverkehr - Forschungsstand und planerische Umsetzung; Seminarbeiträge; 1980
- Heft 6: Beiträge aus Wissenschaft und Praxis
Wilhelm Mecke zur Vollendung des 75. Lebensjahres; 1982
- Heft 7: Hans-Jörg Eulitz
Kälteverhalten von Walzasphalten - Prüftechnische Ansprache und Einfluß kompositioneller Merkmale; 1987
- Heft 8: Horst-Richard Milbradt
Einfluß der Einsatzbedingungen von Vibrationswalzen auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltbetonen mit unterschiedlicher Verdichtbarkeit; 1988
- Heft 9: Peter Pohlmann
Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltstraßen; 1989
- Heft 10: Siegfried Dörschlag
Ermüdungsrechnungen für Asphaltbefestigungen unter Einwirkung mechanisch und thermisch induzierter Spannungen; 1989
- Heft 11: Manfred Hase
Zur Zugviskosität von Asphalten bei hohen und tiefen Temperaturen; 1991
- Heft 12: Beiträge aus Wissenschaft und Praxis
Wolfgang Arand anläßlich seiner Emeritierung; 1994
- Heft 13: Holger Lorenzl
Modell zur Ermittlung der Nutzungsdauer von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt in Abhängigkeit von der Bindemittelviskosität; 1996
- Heft 14: Karsten Rubach
Einfluß der Zusammensetzung von Asphaltbetonen auf deren Ermüdungsbeständigkeit unter Berücksichtigung kryogener Zugspannungen; 1996
- Heft 15: Stefan von der Decken
Triaxialversuch mit schwellendem Axial- und Radialdruck zur Untersuchung des Verformungswiderstandes von Asphalten; 1997
- Heft 16: Anja Sörensen
Zugviskosität von Asphalten mittels Retardationsversuchen unter Zugrundelegung rheologischer Modelle; 2000

- Heft 17: Christoph Dröge
Verwertung von Fräsasphalt in Deckschichten aus Asphaltbeton; 2001
- Heft 18: Peter Renken
Verdichtung von Walzasphalt im Laboratorium und im Feld; 2002
- Heft 19: Tobias Hagner
Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischem Scher-Rheometer; 2003
- Heft 20: Ulf Zander
Einfluß der Luftdruckschwankungen in Asphaltblasen auf den Verformungswiderstand frisch verlegter Asphaltbetondeckschichten; 2004
- Heft 21: Konrad Mollenhauer
Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche; 2008
- Heft 22: Kerstin Schindler
Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung; 2008
- Heft 23: M. Wistuba, C. Monismith, H.U. Bahia, P. Renken, F. Olard, R. Blab, K. Mollenhauer, K. Metzker, S. Büchler, J. Grönniger, M. Zeng, K. Nam
Asphaltverhalten bei tiefen Temperaturen / Asphalt material behaviour at low temperatures, Festschrift zu Ehren des 80. Geburtstags von Professor Wolfgang Arand; 2009
- Heft 24: Stephan Büchler
Rheologisches Modell zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Asphalten; 2010
- Heft 25: Alexander Ringleb und Benjamin Herzberg
Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs / Einfluss der Art der Asphaltmischgutherstellung von Asphalttragschichtmischgut mit Ausbauasphalt im Laboratorium auf Asphalteigenschaften; 2012
- Heft 26: Tobias Wermuth
Lebenskostenplanung für den Straßenoberbau mittels Markov-Prozess vor dem Hintergrund des Public Private Partnership; 2012
- Heft 27: Fabian Achilles
Rejuvenatoren - Zugabemittel bei der Wiederverwendung von Asphaltgranulat mit verhärteten Bindemitteln; 2012
- Heft 28: Axel Walther
Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen unter Berücksichtigung stündlicher Beanspruchungszustände; 2014
- Heft 29: Sven Hahn und Johannes Schrader
Auswertung der dissipierten Energie zur Bestimmung der Ermüdung von Straßenbauasphalt bei verschiedenen Prüfungsarten / Erweiterte Untersuchungen auf den Einfluss der Probenvorbereitung und Regelungsvorgaben auf Ergebnisse von Oszillationsmessungen mittels Dynamischen Scher-Rheometer; 2015
- Heft 30: Noor Ahmad
Crack detection in asphalt pavements by means of Ground Penetrating Radar (GPR); 2017

- Heft 31: Arnd Bartholomäus
Bestimmung der Wasseraufnahme von Asphaltgranulat; 2017
- Heft 32: Chiara Riccardi
Mechanistic Modeling of Bituminous Mortars to Predict Performance of Asphalt Mixtures Containing RAP; 2017
- Heft 33: Alexander Alisov
Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie; 2017
- Heft 34: Jens Grönniger
Ansprache der inneren Struktur von Asphalt und Einfluss auf ausgewählte Asphalteigenschaften; 2018